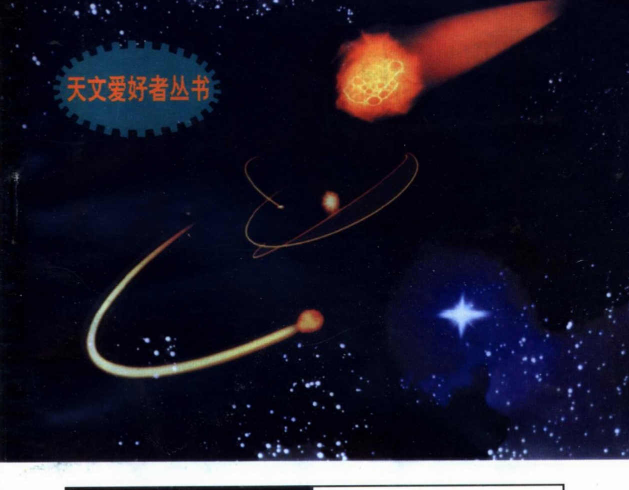


生死有命的恒星族

主编　张金方　邓先明　●编写　张　惠

中国建材工业出版社

TIAN WEN AI HAO ZHE CONG SHU



责任编辑：王苏娅
封面设计：郭　媛

策划：北京汉洲文化艺术有限责任公司



ISBN 7-80090-816-X/G·144
（共12册）总定价：70.00元

天文爱好者丛书⑪

生死有命的恒星族

编写　张惠

中国建材工业出版社

目　录

恒星漫话

星海纵横

星空透视

天上核电站

恒星漫话

恒星肖像

睛朗的夜晚，仰望苍穹，只见满天都是闪烁着的星星。如果这时天空中没有月亮，那么我们能看到的星星就会更多。在我们能用肉眼看到的满天星斗之中，除了金星、木星、水星、火星、土星这五颗位置经常发生移动的行星之外，其余的就全都是恒星了，这些恒星离我们非常非常遥远，它们和太阳一样，自己能发光发热，所以人们常把它们叫做运动的太阳。说到这里，也许有人会问："这远方的太阳离我们到底有多远呢？看上去，它们不是就在我们的头顶上吗？"是的，看起来这些"远的太阳"就在我们头顶上，可实际上，它们和

我们的距离却远得难以想象。除了太阳以外，离我们最近的一颗恒星是比邻星，它离我们也有4.22光年。一光年就是光在一年之中所走过的距离，它大约等于十万亿公里。所以，比邻星虽然是我们的邻居，你想去作客拜访那可不容易。你想想，它远在4.22光年以外，打个电报，无线电波就得在太空中飞上四年零三个月才能到那儿，八年半以上才能收到回电。如果乘坐宇宙飞船，以每秒16公里多的速度，直飞比邻星，那就需要飞上八万年才能到达。

在亿万颗恒星中，比邻星是除了太阳之外离我们最近的恒星，那些远的恒星离我们胡几千光年年、甚至几万光年。而比它们更远的恒星，更是多得数也数不清。目前，利用现代威力最强大的射电望远镜已经能够探测到大约一百亿光年的宇宙深处。但是，如果要问最远的恒星离我们究竟有多少光年呢？这是难以回答的，因为目前我们观测所及的，只是宇宙的一小部分，不管一颗恒星离我们多么遥远，总还有无数的星星比它更为遥远。

满天的星星看上去都是一个个小光点，它们的大小差别是很大的。就拿太太这颗恒星和其他恒星做个比较吧！我们知道太阳的直径是

139 万公里，有的恒星的直径却要比太阳大一千倍以上，体积也就比太阳大好几十亿倍。在目前已经发现的一些恒星中，有一颗名叫“柱六”的，就比太阳的体积大 90 亿倍左右。如果把太阳放在柱六这颗恒星的中心，那么就连木星的轨道都在它的肚皮里呢。如果有一架喷气式飞机，以每小时两千公里的速度从柱六这颗恒星的中心往外飞，要一刻不停地飞上 80 年，才能飞到这个星球的边缘。

有的恒星个儿又特别小，甚至比地球、月亮还要小。最小的恒星是中子星，它们的半径只有十来公里，连地球也要比它的体积大了两亿多倍呢。

恒星的大小虽然相差那么大，可它们的质量却差得不很多。我们知道，太阳的质量大约是两千万万万万亿吨，最重的恒星，也只比太阳重百十倍，而最轻的恒星，又只比太阳轻几部。既然恒星的大小差得那么多，为什么体重又相差得很少呢？这是因为有些恒星是在摆“空城计”，它们看起来很大，实际上里面很空虚，其构成物质比空气还要稀薄得多，所以体重就轻了。而中子星却也得特别结实，在这种恒星上，像火柴盒那么大小的一块物质竟有 20 亿吨重。当然，这

样的东西，在地球上是找不到的。

恒星一般都发光。光正是恒星向我们通风报信的“密码电报”。它的“密码”就是星光的颜色。我们知道恒星的颜色和它的温度有密切关系，温度不同，所发光的光的颜色也就不一样。在炼钢的时候，随着钢水温度的逐步升高，它的颜色就会发生有规律的变化，开始是红色，以后随着温度的不断升高，它就从红色变到橙黄色，再到黄色、白色以至蓝白色。把这些原理应用到恒星上去，我们就可以根据星光的颜色来估计它们的表面温度。恒星的温度是大不相同的，即使我们用肉眼观察，也可以看出恒星有蓝、黄、红等等各种不同的颜色。

如果我们让天文望远镜收集到的星光通过一个三角形的玻璃棱镜，它们就会分解成一条红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等不同颜色组成的彩带，这种彩带就叫光谱。各种恒星的光谱是不同的。对光谱进行仔细的分析，可以帮助我们精确地确定恒星的颜色与温度之间的关系，并且进而推算出恒星的温度来。不同的恒星，光谱可以有很大的差别。例如，有的星以发射蓝色光为主，因而呈蓝色，被叫做蓝星；有的又以红色光为主，因而呈红色，被叫做 星。这就表明恒星的

表面温度大不一样。蓝白星表面温度很高，大约是摄氏二万五千度到四万度；白星温度低；红星的表面温度最低，大约只有二、三千度。近年来，人们应用红外技术进行观测，又发现了不少主要辐射红外线的红外星。这类恒星的表面温度比一般恒星低得多，只有一千多度，甚至只有几百度。

“恒星”，顾名思义就是不变的星，永恒的星。人们在古时候以为，每一颗恒星在天空上的位置是永恒不变的，所以不同的恒星在天空中的相对位置也是固定不变的。这到底对不对呢？

从表面上看来，恒星之间的相对位置在天空中确实是固定不变的。天空中的主要恒星都可以用想象中的线条连结成一定的几何图形，这些图形就叫星座。目前，天文学家们把整个天空一共划成 88 个星座。在中国古代，人们很早就觉得在织女星附近的那些较暗一些的星星，似乎构成一个织布用的梭子的形状，因此民间就把它们称为“梭子星”。牛郎星和它两侧近旁的两颗星，大体上正好在一条直线上，它们好像是一条扁担，所以民间就将它们称做“扁担星”。古代的“扁担星”，到今天还像一根扁担。这样看来，恒星尽管不停地东升西落，但是它们之间

的相对位置，却似乎真是固定不变的。

然而，恒星的相对位置难道真的固定不变吗？当然不是，我们说恒星不变，都指的是在短时期内用肉眼观察时，完全看不出它们的变动。实际上，许多恒星都运动得很快，速度可以达到每秒钟几公里、几十公里、甚至几百公里。既然恒星跑得那么快，为什么又看不出它们在天上飞跑呢？这还是因为恒星离我们实在太遥远了。大家都有这样的经验，远处的火车虽然跑得很快，但一远，看起来就仿佛开得很慢了，同样的道理，我们用肉眼就没法看出恒星的运动。但是，用精密的天体测量仪器观测一段时间，天文学家们就会发现这些恒星确实是在运动着的。

恒星不但在运动，而且也在不断地变化，只是大多数的恒星变化得比较慢罢了。但是也有一些恒星，在不太长的时间里，亮度就有了比较明显的变化，这些星叫“变星”。还有的星，原来很暗，后来因为某种原因，突然发生爆发现象，一下子就亮了几百倍、几千倍，甚至几十万、几百万倍。这时在天空中就好像突然冒出了一颗新的星星一样，于是，人们就把它们叫做“新星”。还有些恒星，爆发的规模比新星还要大得多，爆发时，它们的亮度一下就增加了几千倍，

甚至上亿倍，这种星就叫做“超新星。”例如，在我国宋朝时就曾经记录了一颗非常著名的超新星，它于1054年突然爆发，亮得白天都能看得见，过了23天才逐渐暗沉下去。

从以上简单的介绍我们可以知道，恒星世界确实是瑰丽多姿，丰富多采的。

恒星的起源

恒星的生命是漫长的，它的演化也十分缓慢。恒星的一生大致可以分成四个阶段：第一阶段可以说是恒星的“出世、幼年、少年”时期；第二阶段是“壮年”时期，太空中绝大多数恒星处于这一阶段；当其演变成一颗红巨星时，便是恒星的第三阶段了；经过红巨星以后，恒星进入了暮年，此时恒星的温度达到了顶点，能源几乎枯竭。这一时期恒星的一个重要特点便是不稳定，不稳定状态首先表现为脉动，再往后就进入爆发阶段而慢慢地坍缩，平静地“死去”。

在晴朗无月的夜晚，向长空望去，如同星海泛舟，熠熠闪光的星星令人目不暇接：有的亮些，有的暗些，有的发蓝，有的偏红。这些星中除了太阳系的几颗行星之外，都是遥远的恒星。恒星不论质量、体积和温度都比行星大得多，只

是由于它们离地球太远了，所以看起来亮度、大小和行星相差无几。

恒星是宇宙中最有趣和最重要的天体，它们像世间万物一样，也有生有死。人们把天体起源、地球起源、人类起源和生命起源称为四大起源。在天体起源中，恒星的起源尤其受到天文学家的重视。

经过多年的观测，天文学家发现我们银河中许多美丽的、由气体和尘埃组成的星际云是恒星诞生的场所。猎户座大星云就是一个很好的例子，被称做猎户座四边形的四颗星是在非常近的时期里才凝聚成的。当尘埃和分子云的某一部分的密度比云的平均密度稍高时，新生星的形成过程便开始了。这一区域物质的自引力作用驱使云聚集起来形成团块，当团块继续向里收缩时，其密度、温度和内部压力均在增加。当内部压力大到与自引力平衡时，收缩过程停止，星云中出现了许多热并且相对密集的稳定区域。天文学家已在一些亮星云的背景上观测到许多小而圆的暗星云状物质，被称为球状体的斑点，也称为博克球状体，因美国已故天文学家B·J·博克的研究而得名。在太阳附近1600光年范围内已探测到200个球状体，它们

的质量在 20～200 倍太阳质量之间，直径从 1 到 4 光年，温度为 5～15K，并通过近红外、以及一氧化碳、甲醛和氨分子等特征射电辐射的探测，人们发现这些球状体正以每秒 500 多公里的速度在其自身引力的作用下向里收缩。当球状体的外层从不断引力收缩所得到的能量辐射到周围空间去以后，外层也就落入星体中去了。到这时，一颗发光的球体就变为了一颗原恒星了。原恒星继续收缩，星体内部温度不断升高，待中心温度达到 500 万 K 以上时，原恒星变成一个表面温度为几千 K 的发光的星球。对于一个主要由氢组成的浓密星球，当中心部分的温度高达 10^7K 时，氢聚变为氦的核反应便发生了，恒星开始进入其“壮年”期。

恒星的演化

现在科学家已公认恒星由星际云变来。

宇宙空间弥漫着许多星际物质，非常稀薄，其中主要成份是氢原子和氦原子。它们受到某种扰动或刺激可能会聚集起来形成星际云，有的像一块淡淡的雾斑，用肉眼就能看到。

星际云在自身引力的作用下不断收缩，温度慢慢升高，密度不断增加，开始是透明的，后

来变得不透明了，经过几十万年的演化就可能变成恒星的"胚胎"。1946 年美国天文学家巴纳德在一些暗星云中发现了一种"球状体"，它完全不透明，似云非云，密度介于星云和恒星之间，体温不过几十度，不能发光，很可能就是一种"星胚"。

"星胚"继续收缩，温度继续升高，慢慢地变成了星的"胎儿"。这种半星半云的天体，叫作 H—H 天体，最早是由美国的赫比格和墨西哥的阿罗在一些暗星云区发现的。它小而暗，比巴纳德天体更密集，光谱中能见到发射线，是一种变光云状体，"生长"很快，存在的时间也只有几十方年。

H—H 天体进一步收缩，更多的引力能转变成热能，中心部分的温度和密度迅速增大，结果就演化成了具有恒星外形并处于相当稳定状态的恒星，而在这以前，"星胚"也好，"星胎"也好，都只能叫作"原恒星"。金牛 T 型变星是刚诞生的恒星的代表，它们的共同特点是中心温度可以高达几万、几十万度，主要能源仍然来自引力收缩，对外发出的光和热不多且有变化。

美籍华裔科学家黄绶书在 1961 年曾预言有红外星存在，红外星的特点是表面温度比较

低，辐射的电磁波主要分布在红外波段。果然，这一预言在1965年得到了证实。红外星中的一部分正是形成过程中的早期恒星，由于被浓厚的弥漫云层包围，云层的温度只有几百度，所以发出来的都是我们人眼看不见的红外线。

刚诞生的恒星已经出现在赫罗图上的右侧。在它继续收缩的过程中，有一段时间表面温度几乎不变，但体积缩小，光度下降，于是在赫罗图上的位置由上“滑”向下或左下；后来内部湿度上升，表面温度增高，它在赫罗图上也跟着“拐”向左或左上。只有当核心温度升高到几万度，“炉子”里的氢核燃料终于被“点着”时，刚诞生的恒星才演化成了“成熟”的恒星——到达了主星序的位置。

并不是所有刚诞生的恒星，都是循着同一路线，以同样的速率，并都演化到主星序的上端的。1961年，日本天文学家林忠四郎经过反复研究论证，认为恒星演化“落”到主星序上的位置各不相同，主要取决于它们的质量：质量比太阳小的进入主星序的下端（光度小，温度低），质量比太阳大的进入主星序的上端（光度大，温度高），质量和太阳相近的进入主星序的中部（光度和温度适中）。同时，恒星的质量越大，收缩

越快，演化到主星序所需要的时间也越短，通常需要几千万年。

这一段可以说是恒星的幼年阶段。正是因为林忠四郎对幼年阶段的恒星进行了详细和卓有成效的理论研究，所以这一阶段又称林氏阶段。

恒星演化到主星序之后开始真正稳定下来，进入它一生中最安定的青壮年时期。它依靠氢聚变为氦的热核反应释放出巨大的能量，使向外的辐射压力同向里的引力势均力敌，既不收缩，也不膨胀，表面温度和发光强度不变，保持着平衡的状态。恒星处在主星序青壮年的时间最长，一般可达几亿、几十亿年，所以我们看到的恒星90%以上是主星序。

1952—1958年，美国天文学家马丁·史瓦西和桑德奇合作，对主星序上不同质量的恒星的结构和演化进行了深入的研究和计算。他们发现，当主星序通过热核反应使氦的质量增加到占恒星总质量的12%时，恒星的结构就会发生明显的变化，并开始离开主星序向赫罗图右面的红巨星区演化。他们还告诉我们，不同质量的恒星在主星序上停留的时间不同，质量越大，热核反应越猛烈，演化就越快，停留在主星序上

的时间也越短。太阳可以在主星序上停留100亿年，现在刚过一半，今后还可以稳定地照耀50亿年。比太阳质量大15倍的恒星，好摆阔气，大肆挥霍，只能在主星序上轰轰烈烈地“坐镇”1000万年；而质量只有太阳质量15倍的恒星，百般吝啬地消耗着它那不充裕的氢核燃料，为的是能够安安稳稳度过它不那么富有的生气和活力，但时间长达1万亿年的青壮年时期。

恒星核心部分氢核燃料的用尽是它结束主星序阶段即青壮年期的标志，此后它进入了恒星演化的老年期。老年期的恒星相继用氦、碳等作热核燃料，核心温度高达上亿度，外壳膨胀，体积增加数千倍。正是由于老年期恒星的表面积大大增加了，表面温度则随之降低，结果是恒星在赫罗图上的位置向右上方移动，成为一颗表面温度低、颜色发红和体积大、光度高的红巨星。参宿四和心宿二就是两颗有名的红巨星，它们的直径分别是太阳的460倍和160倍，表面温度只有3500度左右，光度则比太阳高出成千上万倍。

由主序星向红巨星演化所用的时间比较短，而红巨星本身也不怎么稳定，一会儿向造父变星和脉动变星等变星区靠拢，一会儿又返回

红巨星的队伍，存在时间通常为几千万年。

等到恒星内部各种热核燃料统统用完，全部变成最稳定的元素时，所有的热核反应也就结束了。这时向心引力失去了平衡它的力，变成“全无敌”，于是恒星发生不可阻挡的坍缩，体积变小，温度升高，光度下降，在赫罗图上越过主星序而趋向左下方，从此无可挽回地进入了它的衰亡期。恒星怎样衰亡，它的归缩如何，最终还是取决于质量，因为在这时，没有了“对手”，与质量相关的引力就处于至高无上的地位了。

质量比较小的恒星，衰亡比较平静，它在引力的作用下不断坍缩，最后变成密度极大的白矮星。白矮星苟延残喘，依靠散发余热发光。随着余热的逐步散失，温度越来越低，最后变成寒冷而黑暗的黑矮星，在孤寂的太空中度过它漫长的余生。

晚年恒星无论质量多大都能变成白矮星吗？本世纪 30 年代，美国印度裔物理学家钱德拉塞卡在研究恒星结局理论时，吃惊地发现白矮星电子间的斥力（相当于恒星内部热核反应产生的向外压力），只能顶住质量小于 1.4 倍太阳质量的星体的坍缩，这个值后来被称之为“钱德拉塞卡极限”，意思是说，只有质量小于 1.4

倍太阳质量的恒星，最终的结局才是稳定的白矮星。钱德拉塞卡由于研究恒星结构和演化理论的卓越成就，与福勒一起分享了1983年的诺贝尔物理学奖。

质量比较大的恒星演化到后期，在继续收缩的同时会发生猛烈的爆发，这就是超新星爆发，亮度一下子猛增升万倍甚至上亿倍，堪称恒星世界中最猛烈的爆发现象。爆发的结果，一种是恒星物质完全分崩离析，以极大的速度散向空间，重新回归弥散状态，恒星本体当然已不复存在；一种是恒星抛射掉大部分物质后，剩下的部分坍缩成为密度比白矮星还要高的天体，那就是中子星和黑洞——正常的中子星质量为1.4—2倍太阳质量。

恒星的身份证

仰望星海，星光点点，夜色深沉。要想知道每一颗恒星的身份似乎是不可能的，真是望星兴叹。那么，现在对每一颗恒星的特征了解的如何呢？今天，我们回答这个问题既肯定，又简单。肯定和简单就在于当你走进恒星天文学家的观测研究室时，一切就会一目了然。你随便说一颗恒星，天文学家们就会胸有成竹地给你找出它

的档案，告诉你这颗恒星的身份特征。

名称

“人”是总概念，“恒星”也是总概念。具体的人要有名字，具体的物也要有名字。天上的恒星也都有名称吗？毋庸置疑，每颗恒星也有名字。只有这样，才能具体地观测、分析和研究它们。当然，所谓名称，正如你我的名字一样，仅起代号的作用罢了。

中国古代早就给明亮的恒星起了专门的名字。这些恒星名字可以归纳为几种类型：根据恒星所在的天区命名，如天关星、北河二、北河三、南河三、天津四、五车二和南门二等；根据神话故事的情节来命名，如牛郎星、织女星、北落师门、天狼星和老人星等；根据另二十八宿命名，如角宿一、心宿二、娄宿三、参宿四和毕宿五等；根据恒星的颜色命名，如大火星（即心宿二）；还有根据古代的帝王将相官名来命名等。

上述恒星都是比较引人注目的亮星，它们是恒星中的“大人物”。然而它们在恒星中仅是极少数。除此之外，暗弱的恒星是多数，这些“小人物”也应有名字啊！是的，天文学家们绝没有忽视这些“小人物”。早在1603年，德国业余天文学家拜尔（Bayer. Johann）就注意到前人

对恒星命名有“偏见”。这位律师职业的业余天文学家吁请天文学家们注意这个“平等待遇”问题。他建议恒星的代号名称是：每个星座中的恒星从亮到暗顺序排列，以该星座名称加一个希腊字母顺序表示。如猎户座α（中名参宿四）、猎户座β（中名参宿七）、猎户座γ（中名参宿五）、猎户座δ（中名参宿三）……。如果某一星座的恒星超过了24个希腊字母，就用星座名称后加阿拉伯数字。如吞鹅座61星，天兔座17星等。当然，随着科学的发展，天文工作者也还有其它系列的命名方法。如今，大望远镜和新的观测技术不断涌现，被观测到的恒星越来越多，天文学家们就像管理户口一样，将它们一一登记入册。你想找哪一位，就像查户口一样，可以先从“户口簿”上把它们找到，再通过天文望远镜和它们相见。

体积

夜空中的繁星闪烁着微不足道的点点光辉，似乎没什么体积可言。但是，天文学家们还是找到干涉法和月掩星法等方法，测出了恒星的角直径，从而可以求得恒星的体积。这说明任何事物都是可以认识的，关键是潜心研究。

研究结果表明，恒星的体积不是小得可怜，

而是大得令人吃惊。你已经知道，太阳的直径是地球直径的 109 倍，太阳的体积是地球体积的 33 万倍。如果它和恒星比个儿，就只是中等身材而已。比如，牛郎星的直径是太阳的 1.7 倍，织女星的直径是太阳的 2.8 倍，大角星的直径是太阳的 23 倍，毕宿五的直径是太阳的 45 倍，天津四的直径是太阳的 106 倍，心宿二的直径是太阳的 600 倍，参宿四的直径是太阳的 900 倍，仙王座 VV 星的主星直径是太阳的 1600 倍。也就是说，仙王座 VV 星主星的直径足足有 22 万万千米，是地球到太阳距离的 14 倍，甚至可以把土星轨道放在它的身躯里。每小时飞行 1000 千米的飞机，从 VV 星的一端飞到另一端的话，也得不停地飞上 250 年。VV 星的体积可称得上恒星之王。这么说，太阳体积在恒星世界里算是最小的了？也不是。还有比太阳身材小的恒星。比如，密度很高的白矮星，直径仅有太阳直径的百分之一，它的体积和地球差不多。中子星的体积更小，直径仅仅十几千米。可见，恒星的体积差异是十分悬殊的。

距离

既然大多数恒星体积都如此庞大，那么，为什么我们看起来恒星却只是发出缕缕细微的弱

光呢？当然，唯一的解释就是恒星离我们实在太遥远了。前面已经介绍了，表示恒星距离的单位要用光年。光以每秒 30 万千米的速度，在一年中不停地跑，所跑过的一段距离，大约有 10 万亿千米。这段距离叫一光年，作为测量恒星距离的一把尺子。

星际空间深幽幽，路遥遥，天文学家们是如何建起量度恒星距离的方法呢？天文学家们有非常巧妙又非常科学的思路。他们利用周年视差法、造父视差和力学视差法等，测定恒星与我们的距离。

如果地球不是绕太阳运动的，那么从地球上看同一个恒星就不会有方向上的差异，也就不会有视差产生。如果地球是绕太阳运动的，那么从地球上观测某一颗恒星时，由于地球在其轨道上位置的变化，就必然产生方向上的差异，也就一定会有视差出现。自哥白尼提出“日心地动”学说以后，许多人企图观测恒星的视差，以此来证明哥白尼学说是否正确。但是，自哥白尼提出：“日心地动”说以后 300 年间，并没有人测出恒星的周年视差。因此促使有人开始怀疑恒星的周年视差，这不仅建立了测量恒星距离的方法，同时也使哥白尼学说建立在更科学的

基础上。

世界上最早测出恒星周年视差的有三位卓越的天文学家，他们差不多同时独立完成。1837 年，俄国著名天文学家 В. Я. 斯特鲁维测定出织女星的视差；1837 年，德国著名天文学家和数学家贝塞尔测出天鹅座 61 星的视差；1839 年，英国天文学家汉德森（Henderson）测得半人马座 α 星（南门二）的视差。这三位天文学家开创了测量恒星距离的途径。而且，恒星周年视差的测定有力地证明了地球是绕太阳运动的客观事实，支持了 300 年前哥白尼创立的“日心地动”学说。

恒星的测定，对研究恒星的空间位置、求得恒星的光度和空间运动速度等均有重要的意义。目前，用三角视差角方法已测定了约 10000 颗恒星的距离，这些恒星视差角都不超过一角秒。更遥远的恒星视差有非常小，很难确定它们的距离，只有用其他方法来测定了。

目前已知，与太阳距离在 16 光年以内的有 50 多颗恒星。其中最近的是半人马座比邻星，距太阳约 4.3 光年，大犬座 α 星（天狼星）是 8.6 光年。

等级

对初学观星的人来说，最大的感受是星星明暗差异甚大。天文学家们就把恒星的亮暗分成许多等级，这种等级的名称叫星等。星等是表示天体相对亮度的数值。它是天体光度学的重要内容。星越亮，星等数值越小。星越暗，星等数值越大。

我们知道，看起来光的明暗，一方面和光源发光强度有关，另一方面和光源与观测者的距离有关。因此，我们凭直观感觉恒星的亮暗，还不足以表示恒星真实的亮度。我们把凭感觉表示的星等叫视星等，它反应的是天体的视亮度。

早在公元前2世纪，古希腊有一位天文学家叫喜帕恰斯，他在爱琴海的罗得岛上建起了观星台。他对恒星天空十分熟悉。一次，他在天蝎星座中发现一颗陌生的星。凭他丰富的经验判断，这颗星不是行星，但是前人的记录中没有这颗星。这是什么天体呢？这就引出了这位细心的天文学家一个重要的思路。他决定绘制一份详细的恒星天空星图。经过顽强的努力，一份标有1000多颗恒星精确位置和亮度的恒星星图终于在他手中诞生了。为了清楚地反映出恒星的亮度，喜帕恰斯将恒星亮暗分成等级。他把看起

来最亮的 20 颗恒星作为一等星，把眼睛看到最暗弱的恒星作为六等星。在这中间又分为二等星、三等星、四等星和五等星。

喜帕恰斯在 2100 年前奠定的“星等”概念基础，一直沿用到今天。到了 19 世纪中叶，由于光度计在天体光度测量中的应用，发现从一等星到六等星之间差五个星等，亮度相差约 100 倍。也就是说，一等星比六等星亮约 100 倍。一等星比二等星亮 2.512 倍，二等星比三等星亮 2.512 倍，依此类推。当然，现在对天体光度的测量非常精确，星等自然也分得很精细。把比一等星还亮的定为零等星，比零等星还亮的定为－1 等星，依此类推。同时，星等也用小数表示。比如，太阳的亮度为－26.7 等星，满月为－12.7 等星，金星最亮时为－4.2 等星。全天最亮的恒星——天狼星为－1.46 等星，老人星为－0.72 等星，织女星为 0.03 等星，牛郎星为 0.72 等星。

在晴朗而又没有月亮的夜晚，出现在我们面前的恒星天空中，眼睛能直接看到的恒星约 3000 颗，整个天球能被眼睛直接看到的恒星约 6000 颗。当然，通过天文望远镜就会看到更多的恒星。中国目前最大的光学望远镜，物镜直径

2.16 米，装上特殊接收器，它可以观测到 25 等星。美国 1990 年 4 月 24 日发射的绕地球运行的哈勃太空望远镜，可以观测到 28 等星。

星等又分为目视星等、照相星等、光电星等、绝对星等。这些是恒星履历表中的重要研究内容。

质量

我们都知道，质量是物质的最基本的属性，又是衡量物体的最基本的物量。天体质量的特征就是“巨大”。

测量被研究物体的质量，这本来是很容易理解的事。但是，给恒星称体重，或者说求其质量，恐怕会有人认为这是不可能的。

当我们了解了恒星距离以后，是否应该考虑：恒星这么遥远，居然还能看到它的光辉，那恒星的真实光度一定是很强的了，维持这么长时间的强光源，其质量一定是很可观的。是的，长期以来，恒星质量一直是天文学家们所关心的。根据一颗恒星绕另一颗恒星的运动，可以利用开普勒第三定律计算出恒星质量关系，也可以根据恒星的质量和光度的关系来估算恒星的质量。研究表明，恒星的质量大多在太阳质量的百分之几到 120 倍之间，一般恒星，它就是爆炸

瓦解。如果是质量再小一些的恒星，它的中心温度就不会很高，也就不能成为具有恒星性质的天体。

现在已知质量最大的恒星是HD93250星，它的质量是太阳的质量的120倍。大角星的质量是太阳的10倍，织女星的质量是太阳的2.4倍，天狼星主星质量是太阳的2倍，牛郎星的质量是太阳的1.6倍。天狼星伴星质量约等于太阳质量，麒麟座罗斯614星的伴星质量仅是太阳质量的7%，为木星质量的约70倍。可见，在恒星世界里，太阳质量也居中等地位。当然，目前已准确测出质量的恒星还不多，还有许多研究工作要做。恒星之间的体积相差1000万亿倍，而恒星之间的质量相差仅1000多倍，不难想象恒星之间的密度差别是何等惊人了。

运动

古人所以称“恒星”，意思就是这些天体之间的角距离永远没有变化。难道恒星之间的角距离真的永远不变化吗？当然不是。恒星有自转运动，也有相互绕公共重心的运动，还有空间运动。这里我们只谈空间运动。

恒星的空间运动是指它相对于太阳的运动。这种运动可以是向着太阳而来，远离太阳而

去，向左跑，向右行。一般常把恒星的空间运动速度分成两个支量：与视线方向相垂直的称为切向速度；与视线方向一致的称视向速度。视向速度又分为向太阳而来和远离太阳而去两种。我们看到恒星在天球背景上每年移动的角距，称为恒星的自行。现已测出20多万颗恒星的自行。

每颗恒星都有自己运动的方向和速度。从速度看，有每秒几千米的，有每秒几十千米的，也有每秒数百千米的。可以毫不夸张地说，恒星在飞行。地球上的飞机和火箭的运动，比起恒星运动都只像乌龟在爬行。目前已测出3万颗恒星的空间运动速度。如毕宿五以每秒54千米的速度在离开我们，参宿七以每秒21千米的速度离开我们；天狼星以每秒8千米的速度向我们靠拢，北极星以每秒17千米的速度朝我们奔来，大角星以每秒5千米的速度接近我们，织女星以每秒14千米的速度朝我们迎面而来。在已知向我们而来的恒星中，跑得最快的是武仙星座中VX星，它以每秒405千米的速度飞奔着。在远离我们的恒星中，跑得最快的要算天鸽座BD星，它以每秒500多千米的速度远去。

也许有人要问：太阳也是一颗恒星，它有空

间运动吗？当然有。太阳携带着太阳系全体成员，以每秒约20千米的速度朝武仙座方向运动。说到这里，也许有人担心：恒星都在空间运动，会不会彼此相撞呢？特别是会不会与太阳相撞呢？应该说这种几率是有的。但是这种几率是什么程度呢？科学家们已经推算出，这种几率相当于相距4000千米的两个蚂蚁相对爬行，它们相撞的可能程度可想而知了。因此，对恒星相撞的担心是大可不必了。

光谱

随着近代分光仪器的改进和原子理论的不断进步，光谱分析成了恒星天文学中不可缺少的部分。星光通过天文望远镜和一个玻璃三棱镜（或光栅）之后，就会分解成一条按波长不同而展开的光带——光谱。恒星光包含着恒星各种物理特性的最丰富的信息，由此可以获得恒星大气的化学成分、温度、压力、光度、直径、质量、磁场、自转和视向速度等多种重要参量。

早在1666年，牛顿就已发现，一束白色的阳光穿过一枚三角形的玻璃棱镜之后以扇形展开，成为七色俱全的“彩虹”，它正是太阳的连续光谱。1802年，英国科学家沃拉斯顿在改进牛顿上述实验时发现，太阳的光谱被几种黑暗

谱线割裂了，这些暗线的秘密直到1859年才被揭开。当时德国物理学家基尔霍夫所做的一些科学实验，揭示出任何光谱的性质都由光源的密度和化学成分来决定。他提出了两条定律：(1)每一种化学元素都有它自己的光谱；(2)每一种元素都可以吸收它能够发射的谱线。这就是著名的基尔霍夫定律。

恒星的光谱和太阳光谱相似，即在连续光谱背景上布满分立的暗线，这些暗线称为吸收光谱，它是当炽热物体发出的光经过较冷的低压气体时产生的。那些较冷的低压气体原子吸收了与其特征谱线波长相适应的光，使连续光谱上这些相应位置的光变暗，形成吸收线。各种原子的吸收光谱中每一条暗线的位置都与这种原子发射光谱中的一条明线（亦称亮线）相对应。因此吸收光谱中的谱线也是原子的特征谱线。恒星大气中的每一团气体都同时在发射和吸收光子，过程是很复杂的，但是总的来说是在恒星大气中的各种原子和分子所能产生吸收的那些波长上的辐射被削弱了，以致从星面逸出的辐射的光谱中出现了吸收线。

天文学家将拍摄的恒星暗线光谱与实验室已知各谱线的波长进行了对照，可确定所测恒

星的元素组成；根据谱线的强度，还可以确定各元素的丰度。观测表明，绝大多数恒星的元素含量基本上与太阳相似。到目前为止，在恒星光谱中已证认出元素周期表中90%左右的天然元素，也还有一些恒星光谱至今尚未证认出来。由观测事实知道，恒星的外层也存在类似太阳的光球、色球和日冕结构，如在有些恒星的光谱中出现了属于色球的电离钙和电离镁的发射线；美国“爱因斯坦X射线天文台”观测到许多类型的恒星有X射线辐射，暗示了它们应存在类似日冕的星冕。应当说明的是，人们所观测到的从星面逸出的辐射的光谱并不反映恒星核心内辐射场的光谱，它完全是由表面很薄的一层气体的温度、密度和化学成分决定的，这一薄层的厚度不及恒星半径的千分之一。

在观测中人们发现，颜色相同的恒星，其光谱大致相同，颜色不同的恒星，其光谱也不相同。天上恒星的数目虽然很多，但它们的光谱却大致可分成几种类型。

光谱型	颜　色	表面温度（K）	典型星
O	蓝	40000～25000	参宿一、参宿三
B	蓝白	25000～12000	参宿五、参宿七
A	白	11500～7700	织女星
F	黄白	7600～6100	南河三（小犬座α星）
G	黄	6000～5000	太阳，五车二（御夫α）
K	橙	4900～3700	大角星（牧夫座α星）
M	红	3600～2600	心宿二、参宿四

星海纵横

星系成团之谜

在我们的银河系中，独自活动的单颗恒星只占恒星总数的1/4，成双成对或三五成群的双星或聚星却比比皆是，它们自成体系，相依为命，有人将它们戏称为天界鸾凤。更有趣的是像星系这样巨大的系统也喜欢“群居”。那些两个两个成对出现的星系称为双重星系，其中较大的星系称为主星系，较小的称为伴星系。此外还有三重星系、多重星系。范围更大的，由十几个、几十个以至成百上千个星系组成的庞大的星系集团，则称为星系团。星系团中的每一个星系称为星系团的成员星系。有时又把成

员星系数比较少的星系团称为星系群。

1936年，哈勃提出，银河系和它周围的十几个星系组成一个不大的星系集团，称为本星系群。按照天文界流行的见解，本星系群是由万有引力结合，不参预宇宙普遍膨胀，以银河系为中心，半径为300多万光年空间内的星系的总称。本星系群中各种类型的星系都有，但绝大多数是矮椭圆星系和不规则星系。目前已知本星系群的成员星系和可能的成员星系有40多个，其中最大的几个星系是银河系、仙女座星系和大麦哲伦星系。

除了本星系群外还有许多星系团，离我们最近的星系团是室女座星系团。它位于室女星座，包含约2500个星系，距离约6000万光年。后发座星系团是离我们第二近的星系团，距离约3.5亿光年，包含约10000个星系。

不同星系团所包含的成员星系数量相差悬殊，如本星系群只有几十个成员星系，而后发座星系团却有10000个，如果把一些很暗的星系也计算进去的话，那么它的成员总数可能有几万个。不过如此之大的星系团也为数不多，平均说来，一个星系团的成员星系约为130个，成员星系比较多的星系团称为富星系团。

虽然不同星系内的成员星系数量不一，但它们在线直径上却没有太大的差异，平均直径约为1500万光年。星系团的大小取决于它的内部致密程度以及成员星系的总数。

天文学家按照星系团的外部形态，将它们分为规则星系团和不规则星系团两类。规则星系团大体具有球对称的外形，有一个星系高度密集的中心区，颇有些类似恒星世界中的球状星团，因此又称为球状星系团。规则星系团的成员星系比较多，常常可达数千个，差不多全都是椭圆星系或透镜星系，而且巨星系占有相当大的比重。在宇宙空间中为数更多的是不规则星系团，这种星系团的结构松散，既没有明显的中央星系集中区，也没有明显的特征外形，和银河系中的疏散星团仿佛，所以又叫疏散星系团。大的疏散星系团中的星系数多达2500个左右，小的只包含几十个。本星系群就属这类星系团。在疏散星团中各种类型的星系都有，尤以暗星系占绝对优势。

在靠近我们的宇宙部分，星系团明显地主宰着星系的分布，只有极少数是孤立的场星系。据此，天文学家认为星系有强烈的成团倾向，也许全部或绝大多数星系都隶属星系团，或至少

它们最初是在星系团中形成的。所谓不成团的"场星系"，也可能是某些遥远星系团里最亮的成员，而其余较暗的成员尚无法看到。在场星系的衬托下，只有异常多的星系聚集成一些星系并且彼此非常靠近才能被证认为星系团。

天文学家通过分析星系团内部的运动，对整个星系团的稳定性进行了研究。目前有两种意见，一是认为星系团为一种稳定的结构，另一种意见则认为整个星系团是不稳定的，它们正处于逐步瓦解之中。孰是孰非，一时还难见分晓。

如果把星系团看成是星系的一级成团现象，那么有没有二级成团现象呢，即若干星系团是否聚集成更大的集团呢？根据邻近星系群和星系团视分布的不均匀，相当一部分天文学家同意星系二级成团的观点。由星系团聚集成的天体系统称为超星系团。

20 世纪 50 年代，随着天文学的发展，发现了越来越多的星系和星系团。1953 年，德伏古勒仔细地分析了亮星系的分布，认为绝大部分较亮的星系属于一个很大的扁扁的星系集团，称为本超星系团。本超星系团直径约为 25000 万光年，由本星系群、室女星系团、后发星系团

以及一些较小的星系群和星系团组成。其质量中心位于或靠近室女星系团，银河系在本超星系团内比较接近边缘的位置。

本超星系团的存在使人们一直怀疑的银河系附近星系团空间分布的局部不均匀现象得到了证实。那么，在宇宙空间中，超星系团是不是一种普遍现象呢？天文学家在这方面做了许多工作，目前尽管还不能肯定所有的星系团全部隶属于不同的超星系团，但是超星系团的普遍存在是一个不容忽视的事实。阿贝尔分析他编制的 2712 个富星系团的表时，注意到大概有 50 个超星系团，每个包含 10 个左右的星系团。超星系团呈扁长的形状，长径约为 2～3 亿光年，短径约为长径的 1/4。同本超星系团一样，这种扁形结构表明超星系团可能普遍存在着自转运动。

天文学家提出，在超星系团中，由于成员星系团相距甚远，彼此间的引力十分微弱，再加上成员星系团相对运动的速度弥散度高达 1000～3000 公里/秒，超星系团很可能是一些不稳定的天体系统，它们一面旋转，一面瓦解。在这一过程中，同一超星系团内的某些成员星系团之间，可能还会发生星系交换，就是一个星系团

的星系慢慢地运动到另一个星系团的势力范围之内。离我们较近的超星系团有武仙超星系团、北冕超星系团、巨蛇—室女超星系团等。

超星系团的概念提出后，相继得到了一些观测结果的支持。前几年，美国哈佛史密森天体物理中心观测发现，在牧夫座空洞周围有由众多星系组成纤维状超星系团，如含有 10 万个星系，跨越双鱼—英仙—天猫—大熊四个星座，长达 7 亿光年的项链式狭长超星系团，以及延伸 10 亿光年以上，距太阳 2～10 亿光年的位于英仙座和飞马座方向的超星系团或星系链。此外，用多镜面望远镜在 6×117 平方度天区内测得的 1100 个亮于 15.5 等星系的空间分布情形表明，在 5 亿光年的深空，星系的分布呈泡沫状结构，星系和星系团聚集在"泡沫"壁面上。有些天文学家还由此得出整个宇宙是由一个超星系团和一个大空洞组成的海绵状结构的结论。但也有一些天文学家提出异议。他们认为：亮星系分布不均匀的现象，是由于离银河系较近的一些星系团、星系群里的星系偶然相互接近的结果，而不会构成比星团更高一级的天体系统。然而大多数天文学家仍相信超星系团的存在。

如上所述，小到恒星，大到星系团，各种天

体的空间分布是不均匀的，它们组成了各种天体系统。从单个星系、双重星系到星系群、星系团、超星系团，构成了一个阶式等级结构。天体系统的级别越高，范围就越大，但它所包含的次一级天体系统的个数就越少，而且本身结构的稳定性就越差。

这种成团的阶式结构是否会无限扩展下去呢？从目前的观测水平来说，没有证据表明超星系团会集结成更大的系统。哈勃、兹维基和阿贝尔等人认为，星系成团的尺度有一个上限，大致为100万秒差距，因此超星系团是现在已知的最大的星系集团。在尺度小于100万秒差距的空间内星系有强烈的成团倾向。就尺度超过100万秒差距的空间而言，星系的分布可以近似看成是均匀的。但也有人认为超星系团可以进一步成团，形成三级星系团。

总星系之谜

本世纪30年代出现了“总星系”这个名词。其原意是所有观测到的星系的总体，它包括可能存在于星系际空间里的气体质点、电子、尘埃、行星、恒星、星团等等。50年代以后，一些研究者认为总星系是比超星系团更高一级的

庞大天体系统，它的范围可能大于、等于或小于目前观测所及的区域。

总星系是什么？按照我国天体物理学家李启斌的观点，一个体系，一个宇宙层次必须具备一定的总体特性，有共同运动的规律性，共同的起源和演化。同时也只有把这个体系同别的体系区别开来的时候，我们才真正确认它是一个体系。从这个标准看来，我们正在认识总星系路途的中途，还不能回答“总星系是什么”这一问题。

按照我们的理解，总星系就是我们目前所能观测到的宇宙——范围大约200亿光年，也就是现代宇宙学研究的宇宙。宇宙在时间上和空间上以及物质存在的形式都是无限的，回顾天文学研究的历史，在每一时期，人们都是以当时观测所及的范围为依据，不断深化对宇宙的认识。毫无疑问，随着科学技术的进步，天文学家的视野将会推向更遥远的空间范围，我们对宇宙的了解会越来越深刻，我们所认识的宇宙的时间和空间尺度就会越来越大。

星系的漩涡之谜

简单地说，星系的漩涡结构就是星系内年

轻亮星、亮星云和其他天体的分布呈漩涡状，由里向外旋卷。这种螺线形带称为旋臂，是盘状星系外形的主要特征。这里所说的盘状星系，指的是正常漩涡星系、棒旋星系和介乎两者之间的星系的总称。详细地说，就是从盘状星系中心隆起的核球两端，延伸出若干条螺线状旋臂叠加在星系盘上。大多数盘状星系有两条旋臂，少数星系有三条以上的旋臂。旋臂主要由O型和B型明亮的恒星“联缀”构成。但除恒星外，旋臂中还含有星际气体和尘埃，而在旋臂的一侧往往可观测到由暗黑的尘埃所组成的窄条。旋臂也是电离氢区集中的场所。

早在1845年4月，罗斯勋爵用口径1.84米的反光望远镜观测猎犬座星云M51时，便已发现这种漩涡形态了，但由于当时无法测定M51的距离，不知道它是我们银河系以外的星系，直到1924年，美国天文学家哈勃在我们的近邻仙女座大星云M31的照相底片上，证认出其旋臂上的造父变星，并根据造父变星的周光关系推算出大星云的距离，确认它是银河系之外的恒星系统以后，对盘状星系漩涡结构的观测和理论探讨，乃成为星系天文学中的热门话题。

观点

盘状星系占全天亮星系的3/4，这意味着旋臂是一种“永恒”的结构，即所谓“物质臂”观点。这一观点认为，漩涡结构是星系中物质的静态分布，旋臂是物质稠密的场所，而且始终是由同一些物质（恒星和气体）构成的，而物质臂的存在又是由星际磁场维持的：带电粒子在磁场中只能绕磁力线旋进，星系中的电离气体被星际磁场所约束，它们“组成一个路障”，使星系中大量的不带电的中性气体和尘埃难以逾越此“鸿沟”。这样，如果星际磁场足够地强，由一小部分星系的气体便能够在旋臂中约束住较大量不带电的物质。

可是，对这种“物质臂”的观点却与两个观测事实相矛盾，一是所谓缠绕问题，二是太弱的星际磁场。1925年前后，荷兰天文学家奥尔特等人就已发现：离星系中心不同距离处的恒星、星云，它们绕中心转动的角速度是不同的，里边的转得快，外边的转得慢。这就是所谓星系的较差自转现象。如果组成旋臂的老是相同的一些恒星和气体，那么，由于较差自转，旋臂就会越缠越紧，转不了几圈，物质臂就不存在了。以我们银河系为例，在太阳系存在的50亿年中，它

至少已绕银心转了20圈，但射电天文学家对分子云的观测表明，银河系仍具有清晰的漩涡结构，这一事实说明缠绕现象并不存在。其次是星系磁场太弱的问题。从脉冲星和其他射电源的法拉第旋转、21厘米氢谱线塞曼分裂效应的测定，发现银河系大尺度磁场强度只有几个微高斯，即使是几十微高斯也不可能有足够的“刚度”来阻止物质臂的缠绕。因此，物质臂观点应该放弃。

概念

代替物质臂概念的是1942年瑞典天文学家林德布拉德提出来的“密度波”概念。他用单星轨道对圆周运动的偏差来说明密度波：假定恒星除绕星系中心以平均角速度作圆周运动外，还要加上一个椭圆的本轮运动，即恒星绕平均圆轨道作谐振。当圆运动与本轮运动的周期发生共振时，恒星轨道将呈卵形。恒星的渐次偏转的卵形轨道族，相邻轨道间距的疏密变化，可以产生旋臂图案。但这种密度波概念所产生的图形不能定量地与观测结构相比较，因而未能形成为国际天文界所公认的理论。

1964年以来，美籍中国科学家林翘、徐遐生等人在上述密度波概念的基础上，运用等离

子体和流体力学中类似问题的数学方法，提出了新的密度波理论，定量地解释了漩涡星系的主要观测事实。30多年来，这一理论取得了很大的进展。林—徐的密度波理论认为，恒星在绕星系中心旋转时，绕转的速度和空间密度都是波动变化，运动慢则恒星密集，反之则稀疏，因而空间密度也呈现波动变化。这种波既绕中心环行传播，同时又沿径向传播，因而密度极大的波峰呈漩涡状分布，从而形成旋臂。恒星进入旋臂后，因为恒星密度和引力场加强而减慢速度，速度减慢又使恒星“拥挤”在一起，密度增大，引力场加强，因而使这种状况得以自行维持。密度波的一个重要特点是：旋臂中的星不是一成不变的，恒星有进有出，川流不息，而旋臂图案却保持不变，旋臂不会缠绕起来。漩涡形成的低势区对较重的恒星起到减速作用，而较轻的星际气体和尘埃则被聚集在那里，当它们通过波峰时，会被突然压缩形成青蓝色的亮星。这样，沿星系的旋臂便应有大量的中性氢、许多炽热年轻的O型和B型亮星、尘埃带和高温辉光气体。这些都与观测事实相符。

因此，林—徐密波理论得到了国际天文界的认可，国内不少天文工作者对密度波理论也

作出了可喜的贡献。但林—徐理论对于旋臂的起源与演化等问题仍未很好的解决。1979年，柯尔曼德和诺尔曼发现，具有大尺度漩涡结构的星系，要么中心具有棒状结构，要么其近旁有一紧邻星系。

学说

有一些中心既无棒、近旁又无紧邻星系，但存在着较差自转的盘状星系，它们的旋臂不是双臂大尺度宏图而是零散断续状的。这样的漩涡结构，其产生与维持可用盖罗拉和萨依旦两人于1979年创建的随机的、自传播的恒星形成（简称SSPSF）学说来解释：使星系漩涡结构发亮的大质量恒星，发生超新星爆发，这种爆发在星际介质中产生的激波引起邻近星际气云的坍缩，从而形成新的大质量恒星，新恒星的再次爆发，又导致下一代恒星的形成。如此生生不已，这就是星系中自传播的恒星形成。星系盘的强较差自转将使这些恒星形成的区域被“拉”成弧形，从而亮星的轨迹便显示出星系的零散断续状的短漩涡结构。

这一学说还能说明漩涡星系旋臂的松紧程度与星系转速之间的关系，以及从母星系是形成漩涡星系还是椭圆星系的恒星形成率之间的

关系。

问题

一些天文工作者对1000多个亮盘状星系的漩涡结构，按照它们的漩涡形态进行分类，从具有零星断续杂乱短臂的星系到具有对称连续清晰长臂的星系，共分为12类。所得结论是：孤立的正常漩涡星系，2/3具有断续的漩涡结构，棒旋星系和有近邻星系的其他盘状星系，则以宏图漩涡结构为主。但上面所述的林—徐密度波理论和SSPSF两种学说，不论哪一种都不能完满地解释所观测到的形形色色的星系漩涡结构。潘定顿说得好，“星系好像是平静地浮现在宇宙深处的艺术珍品。现在，我们才开始较详细地考察其雕刻细节，以便揭开艺术家们‘锤击’工艺的奥秘。”这就是说，要解决星系漩涡结构的起源、演化以及长期维持的机制等问题，为期尚远，还有大量的观测、统计分析、数值模拟和理论探讨等工作，有待科学家们去做！

红移之谜

宇宙间的一切物质都在运动中。遥远的星系也在运动着，它们都在远离我们而去。例如，

室女座星系团正以大约每秒 1210 公里的速度离开我们，后发座星系团约以每秒 10300 公里的速度飞奔而去，而北冕座星系团离开我们的速度更大，大约每秒 21600 公里。星系为什么要离开我们？我们又是怎么知道它们在运动呢？

在生活中我们都有这样的经验：在火车站站台上候车时，一列火车呼啸着向我们奔来，汽笛的声调越来越高，当火车离开我们时，汽笛的声调逐渐降低。

这是什么道理呢？1842 年，著名的奥地利物理学家多普勒首先阐述了造成这种现象的原因。他指出：声源与观测者有相对运动时，观测者所听到的声音就会发生变化。当声源离观测者而去时，声波的波长增加，音调变得低沉；当声源接近观测者时，声波的波长减少，音调变高。音调的变化同声源与观测者间的相对速度和声速的比值有关。这一比值越大，改变就越显著，后人把它称为“多普勒效应”。

运动的光源发出的光到达我们眼睛时，其波长和频率也发生了变化，也就是说它的颜色会有所改变。虽然天文学家可以利用这一原理测量天体的运动，但是在一般情况下，天体相对于观测者的运动速度与光速相比是微不足道

的，因此光源颜色的变化很难测定。

1849年，法国物理学家费佐成功地解决了这个问题。他提出，观测光的多普勒效应的最好办法，是测量光谱线的位置的微小移动。当光源接近我们时，犹如火车向我们驶来，这时光波的频率增高，波长变短，于是光谱线往光谱中波长较短的一端——紫端移动；反之，当光源离我们而去时，光谱线就向红端运动。

最早对谱线位移进行测量的是英国天文学家哈根斯。1868年，他在口径20厘米的折射望远镜上安装了一台分光镜，用它测出了大犬星座中最亮星——天狼星的一根谱线向红端移动了1埃，即其波长增加了一亿分之一厘米，由此算出天狼星正以46.5公里/秒的速度远离我们而去。这是第一次测得了恒星在视向方向上的运动速度，称为“视向速度”。哈根斯对天狼星视向速度的测量结果是用肉眼配合分光镜的使用而得到的，这种目视测量方法误差很大。今天我们知道，天狼星其实是以8公里/秒的速度朝我们跑来。尽管如此，哈根斯在天体测量学领域所进行的开拓性工作，仍使他在天文学史上占有重要地位。在他之后，特别是进入20世纪以后，天文学家不仅用这一强有力的手段测量出

大量天体的视向速度，还用它来观测河外星系。

红移

星系是巨大的恒星集团，但由于它们离我们非常遥远，每个星系往往只能在大望远镜拍摄的底片上看到一个微弱的光点。对星系我们也能像恒星一样，得到它的光谱。第一个观察和测定星系光谱的天文学家是美国洛韦尔天文台的斯里弗。1912～1925年，他拍摄了40个星系的光谱照片，除了两个星系外，其余都呈现波长偏长的多普勒频移，即向光谱的红端位移，所测得的离去速度高得惊人，最高达5700公里/秒。

对星系视向速度的研究继续进行着。天文学家发现，星系的谱线位移和恒星的谱线位移很不一样。首先，恒星的谱线位移有红移也有紫移，这反映恒星有的在远离我们，有的在接近我们，而星系的谱线位移绝大多数是红移，紫移的极少。其次，恒星的谱线位移不论是红移还是紫移，一般在每秒十公里左右，最大的不超过每秒二三百公里，而星系的谱线红移每秒1000公里以下的只占少数，多数是每秒2000～3000公里，有的甚至达到每秒1万公里以上。

1929年，美国天文学家哈勃发现，在宇宙空间内不仅几乎所有的星系都具有谱线红移现

象，而且还存在着红移量与该星系的距离成正比的关系，也就是说，越远的星系正在以越快的速度飞驰而去，这被称为哈勃定律。

有了哈勃定律，天文学家通过观测星系的谱线红移量，求出星系的视向速度，进而得出它们的距离。例如，一个以1700公里/秒的速度远离我们而去的星系，其距离约1亿光年；一个以17000公里/秒的速度远离我们而去的星系，其距离约10亿光年。目前已观测到的最远星系，正以与光速相差无几的速度远离我们而去，其距离达100多亿光年。

为什么星系都在离我们而去呢？

本质

红移的本质是什么？为什么会存在哈勃定律？这些问题已经争论了半个多世纪，但一直未能得到圆满的解释，因而成了天文学里的老大难问题。

在哈勃定律发表前两年，比利时天文学家勒梅特就提出了宇宙膨胀的概念。1930年，英国天文学家爱丁顿把勒梅特的模型和哈勃定律联系起来，称宇宙为膨胀的宇宙。1932年勒梅特进一步提出现在观测到的宇宙是一个巨大的原始火球爆炸而形成的。到了40年代末，在发

现了太阳的巨大能源来自热核反应后，美国物理学家伽莫夫把宇宙膨胀论和基本粒子的运动联系起来，提出了热大爆炸宇宙学。他认为宇宙起源于高温、高密度的“原始火球”的一次大爆炸。在热大爆炸模型提出后的一段时间内，很少有人关心它。直到1965年，美国贝尔电话实验室的彭齐亚斯和威尔逊发现了3K微波背景辐射（也称宇宙背景辐射）后，才使大爆炸学说一跃成为最有影响的学说。随着其他研究者的后继测量，宇宙背景辐射已成为大爆炸模型有效性的有力见证，成为考虑宇宙中大尺度流动的有用的“绝通过框架”，还因其表现的各向同性，成为发表星系形成理论的重要约束。

天文学家认为，所谓宇宙大爆炸，并不能想象为高密度高能量的宇宙物质在爆炸后，高速冲向早已存在的空虚的空间之中，如果这样，原爆炸中心将会留下一个逐渐增大的空洞。同时，爆炸时辐射比物质走得快，结果爆炸时发出的所有辐射就会与物质分离。实际上这两种现象都不存在，因此宇宙大爆炸必然想象为空间本身自大爆炸开始以光速膨胀。

为了能直观一点想象宇宙大爆炸的过程，我们不妨做个小小实验：把快速膨胀的氢气球

表面比作宇宙，在气球表面点上一些墨迹代表星系，放上一些蚂蚁当作大爆炸后遗留下来的辐射能量。氢气球“宇宙”膨胀时，墨点“星系”互相快速分离，原来彼此离得越远的星系相互之间的分离速度越大，这就演示了哈勃定律所描述的现象。随着气球的膨胀，单位表面上的蚂蚁越来越少，表面辐射密度在均匀下降，这就是存在于宇宙各处的低温微波背景辐射。

大爆炸学说比较自然地说明了许多观测现象，而且理论和观测结果比较好的相符。但是也遇到了一些问题，其中最突出的是“原始火球”是从哪里来的？有的天文学家认为：起初宇宙是极其稀薄的气体，由于万有引力的作用，逐渐收缩成一团超密物质。然后再爆炸，经过膨胀阶段，而重新归于稀薄，稀薄得简直和绝对真空相差无几。我们恰巧生活在宇宙比较饱满的这个非常短暂的时期中。自然，以后这可以再收缩，再爆炸，再膨胀。1965 年，美国天文学家桑得奇甚至估计出这种“脉冲宇宙”每振荡一次大约需要 800 多亿年。这种理论是现实，还是“神话”，目前还不能轻易下结论。

另外一些天文学家，他们不认为星系谱线红移是由它们的退行速度引起的，因此也就不

存在宇宙膨胀的问题。然而，要在多普勒效应之外，再找出红移的另一种解释，实在太困难，至少从目前看来是这样。

有一种解释认为：发出光谱的天体因本身的物理状态不同而产生红移。例如由于星系那里引力特别大，因此发出的光谱中红移特别大，这叫做引力红移。引力红移是广义相对论的预言之一。根据广义相对论，当一个观察者从远离引力场的地方，观测处在引力场中的辐射源发射出来的光的时候，谱线会向长波方向移动，移动量与辐射源和观测者两处引力势差的大小成正比。这种效应最初是在白矮星中得到证实的。但根据引力理论计算的结果来看，引力对红移的影响很小，不足以说明观测到的星系红移现象。

另一种解释则认为光线与传播途中物质相互作用产生红移。光线由星系发出之后，要经过若干万光年才能到达地球，光在长途传播中要穿透许多星系际介质区域，光和介质发生了某种相互作用，使光谱产生红移。星系越远，途中遇到的介质就越多，因而红移也就越大。但光与介质相遇如何相互作用而产生红移，还没有令人满意的解释。

还有一种解释是光线本身变化而产生红移。光线在几千万年的传播之中，光子发生了老化，波长变长而出现了红移。由此推断越远的星系光线走得越久，所以看到的红移也越大。这一假说还没有得到实验的证实。

类星体之谜

类星体是本世纪60年代天文学上四大发现之一。至今，已发现了4000多颗类星体。但是，它们究竟是什么样的天体，仍然是天文学中的最大奥秘之一。

类星体是不容易被人发现的。早先，天文学家发现天空中有一些发射无线电波的点，称之为“射电点源”或射电源。在测出它们的位置后，就可以编成表，叫做射电源星表。英国剑桥大学在1950年编的表（编号为1C）中只有50个射电源。后来发现得多了，就重新编表，比如1956年编的就叫做3C表，1977年编出6C表。

有了射电源表后，天文学家就用光学望远镜找出射电源的对应体。结果发现射电源对应体是多种多样的。譬如，有的射电源是遥远的星系，有的射电源是超新星爆发后遗留下来的星云，但也有不少射电源难以认识，不知是什么东

西。

1960 年，美国天文学家桑迪奇等人用当时世界上最大的 5 米口径的望远镜作搜索观测时，发现 3C48（3C 表中的第 48 号）的位置上有一颗很暗的蓝星，亮度为 7.6 等。在用光谱仪拍下它的光谱后，由于光谱太复杂了，谁也认不出它是什么天体。后来，有人发现 3C273 对应于一颗比 3C48 还亮的天体，它的光谱也很奇怪，也没有人能认出来。

1963 年，美国天文学家施密特仔细地研究了 3C273 的光谱后发现，如果将 3C273 的所有谱线向红端偏一段很大的距离，谱线就可以认识了。由于这个红移量太大，以致使人们过去没有认出来。天文学上把谱线波长的变化值与原来谱线波长（λ_0）的比值，叫做“红移量”，常用 Z 表示，即：

$$Z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}$$

式中 $\lambda-\lambda_0$ 就是波长的变化值。施密特在 1963 年 3 月 16 日证认 3C273 的红移量为 0.158，而 3C48 的红移量太大，使人一时弄不清楚。一般恒星的谱线红移只有千分之几，而新发现的天体的红移量比恒星的红移量要大百倍以上。它们不像是恒星，但在底片上看来又像是

星点。因此，人们将这一类似星而非星的新天体，称为“类星体”。类星体虽然是在射电源中发现的，但后来发现的一部分类星体，并不发射无线电波，它们有很强的紫外辐射，甚至辐射X射线。这一部分天体，有时也称为“蓝天体”。

如果红移用“多普勒效应”来解释，那么，天体在视线方向上远离我们而去的速度（V）与红移量（Z）成正比例，V＝cZ，c为光速。红移量越大，天体远离我们而去的速度也就越大。

从天文学上可知，由天体谱线红移所算出的速度（V），在一定范围内（约1000百万秒差距，1秒差距＝3.26光年）和该天体距离（D）成正比，即有：

$$V = HD \quad \text{或} \ D = \frac{V}{H} = \left(\frac{C}{H}\right) Z$$

这就是著名的“哈勃定律”。对于红移不太大的天体，这个定律是足够准确的（在红移很大时，公式将有变更）。H为哈勃常数，70年代采用的数值是50～75，近年来采用95。

类星体的一个重要特征是红移特别的大。上述的3C273的红移量为0.158，3C48的为0.367，而3C205的红移量为1.53，3C9的红移量为2.01，等等。

对于红移很大的类星体，在计算速度时不

能用上列公式，而要用变更过的式子。比如 3C9 的红 Z=2.01，用变更过的式子计算，它的远离速度是 $V=2.4\times10^5$ 公里/秒，即每秒 24 万公里（相当于光速的 80%），与我们的距离为 D=142 亿光年（取 H=55）。可见，类星体都是很遥远的天体。近年来发现好些类星体的 Z 都超过 4，可算是些红移特别大的天体，它们距离我们有 200 亿光年！

类星体如此巨大的红移，一直是科学上争论的问题。上面的说法是以"多普勒效应"为依据的。但是，也有人认为不能采用多普勒效应，那么类星体就不是很遥远的天体，能量也不会很大。这种争论，我们将在后面专门作介绍。

对类星体仔细观测，会发现大多数类星体的亮度有变化。比如 3C446 类星体的亮度在几个月内增加了三个星等（也就是 15 倍），著名的 3C273 在两年半的时间内强度改变了 40%。类星体光变得快，表明它的尺度是很小的，比如说几光年，有的甚至只有几个"光月"，也就是说，它们的直径只有普通星系的十万分之一，甚至百万分之一。

但是，类星体的辐射又是非常巨大的。根据类星体的亮度和距离，可算出类星体发出的光

要比普通星系强近百倍。而可见光的波段上的能量输出，只是它全部能量输出的一小部分。加上红外的辐射能量，类星体的能量输出比普通星系要大上千倍。类星体不仅有强烈的辐射，而且还有抛射物质的迹象。

现在多数天文学家认为，类星体是星系级的天体，但是它具有体积小、能量大、亮度变化迅速及光谱中有发射线的特点。这些几乎互为矛盾的东西，如何能容在一起呢？因此，类星体的谜太多了。

有人认为类星体是一种活动很剧烈的星系（如塞佛特星系）的核心。由于距离太遥远了，观测不到它周围的气体包层，所以显示为小小的“星点”。如果将塞佛特星系放在类星体的距离上，也许人们会误以为它就是一个类星体。

关于类星体的能源，已提出几种不同的看法。有的人认为，类星体的中心可能有一个质量为太阳几亿倍的中子星，自转周期为几百天。但是这么巨大的中子星从何而来，难以弄清。有的人认为，类星体的中心是个黑洞，其质量为太阳的 $10^7 \sim 10^9$ 倍（1000 万到 10 亿倍）。黑洞吸积并吞噬周围的物质——气体与尘粒，同时辐射出巨大能量。但是黑洞的能量又是如何辐射出

来的，本身就是个问题。因此，类星体的能源，仍然是科学上的一个谜。

星星点将台

红日西沉，太阳落山，当最后一缕晚霞的余辉从天际消失的时候，蔚蓝的天空终于被深沉的夜幕所取代，我们周围一切景物的轮廓慢慢地变得模糊起来，似乎都将融进那无边的暮霭之中。

这时，闪闪发光的星星开始在夜空中出现了，一颗颗，一簇簇，越来越亮，越来越多，过不多久，便把整个夜空点明。

南门二星

是全天21颗最亮恒星之一。南天有个很大的星座，叫“半人马座”。在我国南方地区可以看到它。在这个星座中，有一颗黄色的亮星，这就是南门二。南门二是全天第三位亮星，如果仔细分辨，可以发现它和另外两颗邻近的星一起，形成一个三合星，不过以这颗黄星最亮。第二颗闪亮的星看起来呈红色，它与南门二一起共同组成一对转动周期为80年的双星。这就是著名的、距离我们最近的比邻星了。

大角星

是全天21颗最亮的恒星之一。在夏季，面朝北方，首先找到大熊座中的北斗星，然后将视线沿着北斗星的斗柄3颗星的联线延长出去，就会看到一颗很亮的红星，它就是大角。大角星正好挂在牧夫座那个大降落伞的下面。它是北天最亮的星、全天第四颗亮星，同时也是一颗最亮的红巨星。大角距离我们30多光年，比太阳大而亮，其半径为太阳半径的20多倍，亮度为太阳的190倍。在古代，常用它的位置来定季节和方向。

参宿四星

全天21颗最亮恒星之一。冬季夜晚的星空呈现一派热闹的景象。其中最受注目的，当然是那个不规则四边形的猎户座。猎户座中有亮星也有星云。在猎户座四边形向着东北方的尖角上，有一颗略呈红色的亮星，就是参宿四。它是全天第六位亮星。如果将参宿四与太阳排放在一起，那么参宿四要比太阳亮上10万倍。参宿四是一颗比太阳大得多的恒星，它的半径比太阳的半径要大900倍，也就是说它的体积比从太阳到火星的距离还要大。参宿四也是一颗变

星，不过亮度变化的时间比较长。

参宿四是我国的称呼，参宿又称“实沈”。相传帝王高辛氏有两个儿子，一个叫实沈，一个叫阏伯。兄弟俩整天打架，于是帝王将他们俩分开。实沈住在夏，成为夏族的始祖；阏伯住在商丘，是商族的始祖。夏以参宿为族星，商以大火即心宿二为族星。参、商两星相距很远，这颗升上来，那颗就落下来，永不相见面。

南河三

南河星是全天21颗最亮恒星之一。要寻找南河三并不困难，首先找到猎户座，这是一个很显眼的不规则四边形的星座。然后在猎户座东偏北的方向上，就能很容易地找到这颗略带黄色的亮星南河三了。它与猎户座东北角上的亮星参宿四和猎户座东南方向上的最亮星天狼星，正好共同组成一个等边三角形。南河三是一颗全天第九位的亮星，也是离我们最近的恒星之一。如果用望远镜观看，南河三边上又可发现一颗很暗的伴星，所以南河三又是一个双星。南河三的质量是太阳质量的1.5倍，而那颗伴星的质量只有太阳质量的一半。这对双星互相绕转的周期约为41年。

水委一

水委一星是全天21颗最亮恒星之一。这颗南天亮星是波江座最亮的星。位于弯弯曲曲的波江座的最南端。水委是"江尾或河流终点"的意思。每年12月出现在正南地平线上不高的星空中，而且出现的时间很短暂。在我国只有在南方地区的较低的南天星空才能见到它。水委一星青白色，比太阳亮3000倍，距离我们约125光年，是一颗变星。

十字架二

十字架二星是全天21颗最亮恒星之一。位于南天星座南十字座中。它与十字架三、十字架一共同形成十字架的形状，而十字架二就位于十字架形的一竖的最南端上。我国南方地区有时才能看到它。十字架呈蓝色，距离我们约407光年，是一对目视双星，而主星又是一颗周期为75.8天的分光双星。从十字架二向南延长十字架形的一竖的4倍长，就是南天极。自古以来，十字架二及其附近的南门二、马腹一等亮星，就一直是水手航海时导引方向的定位坐标。

心宿二

心宿二星是全天21颗最亮恒星之一。夏天，在南方天空中，有一个天蝎座，形状像一只大蝎子，一半身子（包括尾巴）都浸沉在银河里，就好像刚从银河里爬出来似的。在这只大蝎子背上，紧靠银河边上有一颗亮星，就是心宿二。因为看起来火红夺目，所以又称“大火”。在心宿二的左右各有一颗星，对称地侍立在它的旁边，那颗近银河边的叫“心宿三”，远离河边的叫“心宿一”。二十八宿中的心宿就是由这三颗星构成的。心宿二一直是海上航行用的导航星，它与猎户座中猎户腰带上的三颗亮星，正好一个升起，一个下落，此起彼落，从不同时在天空中出现。心宿二比太阳大，它的半径比太阳到火星的距离还要大得多。心宿二是双星，同时又是变星。心宿二的伴星是一颗5等星。现代的研究表明，心宿二不断抛出大量物质，这些物质在伴星周围形成一个气壳。在射电望远镜出现后，人们发现它还发射射电波呢。

毕宿五

毕宿五星是全天21颗最亮的恒星之一。冬天的时候，首先找到美丽的猎户座。在猎户的腰

带上有3颗排成一线的星，由此转向西北天空，就来到金牛座。在金牛座中有一颗红色的亮星，会特别引起你的注意，这颗星就是是毕宿五了。毕宿五是全天第十三位的亮星，是我们常说的黄道附近的“四王星”之一（其他三星为心宿二、北落师门和轩辕十四）。这是1颗红巨星，说明在它的一生中中年已快结束，晚年即将来临。当然如果按照人类的历史来计算的话，那也是相当长的。例如，太阳到了这个阶段，它也是延续大约10亿年呢。在这个阶段恒星的特点是体积大，亮度也大，而且呈红色。如果将毕宿五与太阳相比较，那它要比太阳大得多，也比太阳要亮几百倍。

角宿一

角宿一星是全天21颗最亮恒星之一。沿着北斗星柄上三颗星的弧线，一直延伸出去，就可以看到一颗名叫大角的红色亮星，然后从大角开始向南偏西一直下去，便可找到一颗青白色亮星，它就是角宿一。或者从北极星和北斗星的开阳的联线，延伸到南边天空，也可以找到角宿一。在早春时期，它是东南天空中仅有的一颗亮星，很易辨认。角宿一在室女座内，是全天第十六位亮星，又是二十八星宿中的第一宿第一星。

角宿一是一颗正处在中年时代的星星，同时又是双星和变星。人们常用它来定季节，每当角宿一在日落后出现在东南天空时，就说明插种的季节快到了。

北河三

北河三是全天 21 颗最亮恒星之一。从猎户座的亮星参宿四向东北方向，可以看到两颗亮星，它们并列在一起，在它们下面各有一排星星，形成并排着的两个人身，这就是双子座的北河二和北河三。它们好像一对形影不离的孪生兄弟。北河三是其中较亮的一颗，呈金黄色。在冬春夜晚的星空中，闪耀着柔和的光辉，非常美丽。北河三距离我们约 35 光年，是离我们最近的红巨星之一。

北落师门

北落师门是全天 21 颗最亮恒星之一。由飞马座大四边形的右面一边向南延长约 2 倍距离，可以找到一颗桔黄色孤独而又冷清的亮星，这就是北落师门。在秋天晚上南天星空中，是一颗独一无二的明星。北落师门在阿拉伯语中称为“鱼嘴”，位于南鱼座的鱼头处，它与右侧几颗暗星排列成一条鱼在仰首喝北面宝瓶座流出

的仙水的姿势。北落师门是我国古代起的名字，它是以中国古都长安北门的名字命名的。除我国最南端地区外，它是我们所见到的最偏南的亮星。长期以来，航海者常以它来导航。北落师门是一颗比太阳大1倍的恒星，距离我们较近，约20多光年。

天津四

天津四是全天21颗最亮恒星之一。夏季夜晚的天空是非常热闹的。明亮的天河高悬在天空，天河上有一个十字形星座，像只大天鹅，又像只大喜鹊在飞翔，这就是天鹅座。在这只大天鹅的头部，有一颗蓝白色亮星，它就是著名的天津四。它与天河两岸的牛郎和织女正好形成一个很大的直角三角 。“天津”就是天上渡口的意思。在神话故事中不是有牛郎和织女每年七月七日相会一次的传说吗？那么这只大天鹅，就是正在忙碌地为他们的相会架着天桥。天津四的半径比太阳大100多倍，如果把天津四与太阳排放在一起，那么天津四的亮度要比太阳亮上10多万倍呢，它与我们地球之间的距离约有500多光年。

轩辕十四

轩辕十四是全天21颗最亮恒星之一。狮子座中那些组成镰状的星星下边，有一颗白色亮星，相当于狮子的心脏，这就是轩辕十四。它虽是全天第二十一位亮星，但在缺少亮星的春天星空中，可算得上是春星之王。把大熊座的两颗指极星的联线，朝与北极星相反方向延长出去，就可以找到这颗轩辕十四。轩辕十四位于黄道上，当太阳、月球在地的与轩辕十四间通过时，就会发生像日食或月食一样的“掩星”现象。当然太阳是在白天通过，我们看不到轩辕十四被太阳遮住的现象。但是，我们有时可以看到月掩轩辕十四的景象。

自古以来，这颗星一直受到人们的重视，把它看作是“帝王之星”。在西方称它为“小帝王”。在我国轩辕是黄帝的名字，古代对黄帝很崇敬，就把天上的星宿命名为轩辕。轩辕这组星共有17颗，轩辕十四是其中的第十四颗星。

巴纳德星

巴纳德星是至今已知运动最快的恒星。我们所看到的星星，都不是恒定不动的，它们各有自己的空间运动。其中绝大多数的运动速度都

很小，要经过相当长时间，用精密仪器也不能测定它们的变化。但也有少数星的运动速度比较快，其中运动最快的，就是巴纳德星。这颗星是1916年由美国天文学家巴纳德发现。它每年运动约10角秒多，相当于每秒走88公里。巴纳德星是蛇夫座内的红色暗星，距离我们约6光年，如果把它与太阳并排放在一起，那它的亮度只有太阳的万分之四。有人认为巴纳德星有两颗类似行星的伴星，它们3个共同组成一个类似我们太阳系的系统。巴纳德星是仅次于南门二的太阳系第二近邻。

比邻星

比邻星是距离太阳最近的恒星。夜晚仰望天空，看上去天上的星星距离我们都是一样远，其实，有的星星离我们非常非常遥远。但有的却不是那么太遥远。例如，北极星与我们地球的距离是太阳到地球距离的4900万倍，天狼星的距离是太阳到地球距离的5.6万倍。在这些星星中距离我们最近的一颗，名叫“比邻星”。“比邻”就是很邻近的意思。它距离我们4.22光年。我们知道光在1秒钟内能走30万公里，差不多可绕地球4圈。从比邻星发出的光要经过4年多，或者要走差不多40万亿公里才能到达我们这

里。比邻星在南天一个叫半人马的星座里，在这个星座中有一颗全天第三亮星，颜色呈黄色，叫“南门二”，如果用望远镜对准它，就会发现原来它不是一颗星，而是由三颗不同亮度的星组成的。其中第一颗就是那颗最亮的南门二，第二颗比第一颗稍暗一点呈红色，而第三颗也就是最暗的那颗星，就是“比邻星”。

星空透视

概　说

中国民间流传着这样的谚语："三星正南，家家拜年。"在农历大年三十的除夕之夜，晚8点左右，当猎户星座中的"三星"在正南天空时，正是除旧岁、迎新年的时刻。你看，熟悉恒星天空还可以帮助确定时刻呢。

世界上各个民族很早就关注着恒星天空。比如古埃及人注意到：早晨看到狼星（大犬星座中的恒星）出现在东方地平线时，就预示着在两个月内尼罗河水将要泛滥了。中国远在3000多年前的殷代，专门观天的官员在黄昏时看到"大火星"（天蝎星

座中的恒星）出现在东方地平线时，知道该开始播种了。古代的航海家门根据历代的航海经验，把轩辕十四、毕宿五、北河三、北落师门、娄宿三、角宿一、心宿二、牛郎和室宿一这九颗恒星叫航海九星。海员们观测它们在天空中的位置，就可以判别航向。它们起着航标灯的作用。当代星际航行也利用恒星导航。例如，阿波罗 11 号载人登月飞船上设有光学定位仪，把心宿二、毕宿五、五车二、土司空、天津四和角宿一等恒星列为观测定位天体，使飞船沿既定轨道运行。

如果你能通过天文望远镜观测恒星天空，定会给你留下难忘的印象。比如可以看到不同颜色的双星，光度变化的变星，恒星聚集的星团，形态各异的星云等。这些必然会帮助你了解恒星的许多物理性质。因此，熟悉恒星天空既有实用意义，又会使你获得丰富的宇宙知识。

美丽的双星

通过天文望远镜观察恒星天空时，你会发现许许多多的恒星是彼此位置很靠近，两星的亮暗和颜色往往也不一样，犹如星海中的珍珠。我们称这样位置靠近的两颗恒星为双星。可以说，天上的恒星双星多，“单身汉”少。当然，双

星中也不一样。有的是一颗恒星绕另一颗恒星运动，互相有引力关系，这叫物理双星；有的双星仅仅是投影关系，看起来靠近实际相距甚远，没有物理联系，这叫光学双星。我们这里说的是物理双星。比如，天狼星、南门二、南河三、北河二、心宿二、角宿一和五车二等都是双星。天狼星属目视双星，也就是通过天文望远镜才能看到它的双星关系。绕天狼星运动的伴星就是白矮星。角宿一属分光双星。即只有通过分析光谱线变化才能确知是双星，通过望远镜目视是分辨不出的。

在恒星世界中，双星是普遍现象，是小单元的恒星集团。另外，还有一颗恒星绕另一恒星运动，再有第三颗恒星又绕它运动。我们把两颗以上的这种关系，称为三合星、四合星、……或称为聚星。在太阳周围17光年内，共有60颗恒星，其中有32颗是单颗恒星，11对是双星（22颗），两组三合星（6颗）。最好看的双星要数天鹅座 ε 星，通过一般天文望远镜就可分出两颗亮度差不多相等的 ε_1 和 ε_2，再通过高倍的目镜文可看出 ε_1 和 ε_2 各成一对双星。恒星的许多特性都是研究双星等特征获得的。

超新星和恒星之死

太阳每秒钟向外辐射的能量为 3.8×10^{26}焦耳。同一百万吨级（梯恩梯当量）氢弹爆炸的能量相比，这个数值大约相当于在嘀嗒的1秒钟之内，太阳内部爆炸了910亿颗“氢”。秒秒如此，年年如此持续“爆炸”了几十亿年，今后几十亿年内还将如此持续下去。

虽然这个数字大得出奇，但是在恒星世界中却算很平常。比太阳亮上几万倍，即每秒钟要“爆炸”几百万亿颗“氢弹”此的恒星也还有不少。不过，同新星、超新星的爆发相比，这也只不过是“小巫见大巫”了。

新星和超新星其实并不是真正“新”的星。恰恰相反，它们是年龄很老的星，早就存在了。通常它们都很暗，未引起人们的注意。当它们由于某种原因突然变亮（爆发）时，才被人们观测到。新星爆发时，（真）亮度要比太阳大几十万倍。而超新星爆发时更比太阳亮几亿倍，每一秒钟相当于 10^{18}颗“氢弹”的威力。不过，在本书后面介绍的“星系核爆发”，其规模又要比它大得多了。

我国古代天文学家常把新星、超新星这类突然出现而后又消逝的天体称为“客星”，仿佛

它们是偶尔来访的客人一样。

新星爆发现象是比较常见的。银河系内平均每年出现 50 次，但由于种种原因，使得真正观测到的并不多。到目前为止，银河系内已发现的新星近 200 颗。而爆发规模更大的超新星却是非常罕见的，在太阳附近 3 千光年的范围内，大约每两百年才能观测到一颗超新星，这真算得上“百年不遇”。而在古代天象记录中，从寥寥数语的记载中，要明确地证认所记载的“客星”是否是一颗超新星，就必须把它同新星（甚至彗星）区分开来，这往往是很困难的。迄今从古代资料中证认出来的超新星只有八九颗，其中，最有名的有 4 颗，即 1006 年超新星、1054 年超新星（中国新星）、1572 年超新星（第谷新星）和 1604 年超新星（开普勒新星）。对于这此引人注目超新星，我国文献中都有详细的记录。

公元 1006 年 5 月 6 日（北京景德三年四月初二）黄昏后不久，在夜空的南方（豺狼星座和半人马座之间），突然出现一颗非常明亮的超新星，几天之后变得更加明亮，完全可以同半个月亮相比拟（视星等亮达 −10 等。满月的星等为 −13 等，金星亮度为 −4 等）。此后每天黄昏后不久，它从东南方地平线上升起，于是天空中又

出现了一个明亮的“小太阳”，光耀夺目，可谓今古奇观。我国称它为“周伯星”。这颗超新星，与月并存，夜复一夜照耀大地达三年之久，以后才暗到肉眼不能看见的6等以下。我国《宋史，文天志》对它作了明确的描绘：“景德三年四月戊寅，周伯星见，出戊南骑官西一度，状如半月，有芒角煌煌然可以鉴物”。这个超新星离我们的距离不超过1000秒差距（即约3000光年）。

对现代研究影响最大的要算1054年占座超新星，它引起了现代各国天文学家的高度重视。它爆发于公元1054年7月4日（也是我国北宋时代），在《宋会要》中对它作了最为完整精确的记录：“嘉佑元年三月，司天监言：‘客星没，客去之兆也’。初，至和元年五月晨出东方，守天关。昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日”。

这颗超新星，最亮时的视星等超过了天空中最亮的金星，达到了－6等。与此相应的绝对星等为－18等。这种爆发也是极为罕见的，它在明亮的白天尚且芒角四射，持续了23天。往后虽然慢慢地暗了下来，但还继续可用肉眼观测将近两年（650天）。“客星没，客去之兆也”，其后经历了几个世纪，人们再也未能看见它。谁

也未曾想到，这位“客人”竟给我们留下一份极为珍贵的“礼物”。

1731年，英国一个天文爱好者用望远镜在这个方向上发现了一团模模糊糊的云雾状东西，外形像个“螃蟹”，人们称它为蟹状星云。起初，人们并没有意识到这只“螃蟹”的来历，可是从相隔几十年的照片上发现这团星云膨胀了，“螃蟹”长大了。到了1902年，它的半径达到180角秒，测量出来的膨胀速率为每年增大0″21。如果这团星云是一直以这样的速率膨胀的，那么860年之前（即公元1060年左右），正是它们开始向外膨胀的时刻。人们追忆起大约900年前曾经来访的那位客人，并且一致认为，“螃蟹”就是它留下来的“遗物”，即1054年超新星爆发时抛出来的气体壳层。更为有趣的是，1968年，射电天文学家在星云的中心发现了一颗脉冲星（见§2.3）。以后的观测发现，这颗脉冲星不仅发出脉冲射电辐射，而且还发出光学、X射线和γ射线辐射。据认为，它就是1054年超新星爆发后留下的“尸体”。

恒星的衰亡

超新星爆发时抛出大量的物质，释放出巨大的能量，这一切都表明它们正经历着一个急

剧的变化过程。恒星为什么会发生剧变？是否所有的恒星都将发生如此巨大的灾变性爆发呢？为了说明这一点，让我们看一看恒星的演化和死亡过程。

对于一颗处于长期稳定状态的恒星，当其核心部分热核反应的燃料耗尽以后，氢聚变成氦的热核的反应就停止了，而核心的外层还在进行着这种反应。当氢“燃料”枯竭区域内的物质质量超过恒星总质量的12%左右时，由于内部不再产生能量，核心部分向外的压力已抵挡不住向内的引力，为了维持力学平衡，恒星的内部就收缩，收缩时释入的引力能一部分使恒星核心曙度继续升高，同时，另一部分引力能使外壳膨胀，这时恒星就会转化为体积庞大、平均密度较小（但中心密度很大）、光度很大而表面温度较低的红巨星。这时，恒星就进入了晚期演化阶段。如果太阳演化到了红巨星阶段，它的体积将大到足以把现在的地球轨道都包括进去。当然，人们不必为此发愁。太阳离这个阶段还早着哩！它还可以维持现状好几十亿年。在这么长的时间内，未来的人类一定会找到合适的办法来解决他们面临的各种问题。

在红巨星阶段，恒星内部温度超过一亿度，

核心部分是以氦燃烧（氦核聚变为碳核和氧核的热核反应）作为能源的主要方式。由于氦燃烧反应速率及其进程相当快，这个阶段寿命很短。对于像太阳这样质量的恒星，在红巨星阶段逗留的时间只有几十万年至几千万年，而质量大几倍的恒星，氦燃烧阶段可能只有几万年，甚至几千年。当核心部分的氦燃烧完了（氦枯竭）以后，恒星将进入更加急剧演化的阶段，也就是说恒星临近寿终了。

“一切产生出来的东西，都一定要灭亡”。恒星既有生，也就必有死。那么恒星又是通过什么方式衰亡的呢？它们衰亡后究竟要变成什么东西呢？这是人们十分关心的问题，也是近二三十年来天文学研究的一个中心问题。

自然地，人们最先从新星、超新星的巨大爆发现象中得到启发，联想到恒星是否总是通过这种灾变性的爆发而结束它的生命呢？五十年代以前，许多人都有这种想法。但是从人类有史以来的观测资料知道，银河系内的新星只记录了200颗左右，超新星才8、9个，加上还未确认的超新星也不过20颗左右。而人们公认为衰亡后的恒星形式之一的白矮星，数目却相当多。这表明，至少相当大一部分，甚至可能是大多数

恒星是不经过这种剧烈的爆发阶段而逐渐缓慢衰亡的。十几年来的研究发现，这两种衰亡方式都可能存在。

现在，天文学家们认为，当恒星核心部分的氦枯竭以后，其核心基本上就由碳元素组成。此后恒星究竟是缓变还是剧变完全由当时恒星的中心温度和中心密度来决定。

小质量恒星的归宿

对于质量同太阳相差不多（不超过太阳质量的 6 倍）或者更小一些的恒星，当核心部分的氢和氦都枯竭了以后，其密度和温度都不会太高（中心密度低于每一立方几万克，温度低于 5 亿度）。这时以碳 12 和氧 16 为主要成分的恒星核心内不会进一步发生新的热核反应。由于原来的由氦核聚变为碳核和氧核的热核反应已经停止。恒星核心部分没有继续产生能量的源泉，而热量却不断地向外部扩散，这样，恒星内部的压力就抵挡不住向内的引力，于是再次收缩。不过这种过程比较缓慢，它将持续到恒星核心部分的压力可以与引力相抗衡时为止。在这种缓慢收缩的过程中，恒星本身的引力能一部分转化为内部热能以保持恒星内部的高温，另一部分引力能转化为辐射能和驱使恒星外部气层持

续膨胀。恒星核心的不断收缩与恒星外层向外膨胀的结果，最后将使恒星的外壳同它的内核完全分离开来。这气体外壳不断向外膨胀而变成独立于该恒星的气体星云，形成人们观测到的“行星状星云”。在许多行星状星云的中心观测到一颗白矮星，它可能就是分离后的残骸。再过若干年以后，这个膨胀的气体星云将完全消失在太空之中，而只遗留下一颗白矮星。天文学家认为，在几十亿年以后，我们的太阳也将会经历着这种过程，它不会出现像超新星那样剧烈的爆发。

中等质量恒星的厄运

对于质量为太阳的8—20倍的恒星，在氦燃烧阶段结束后的引力收缩阶段中，由于质量较大，引力更强，收缩时中心温度将升得更高(可达8亿度以上)，中心密度也更大。在这种情况下可以产生以碳元素为燃料的一系列核反应，形成镁、钠、氖、氧等较重的原子核。这些核反应多数是放热反应，而且反应得异常激烈，使恒星内部的温度迅速地上升到十几亿度甚至更高，从而引起一系列更加剧烈的核反应，恒星的命运就决定于这些核反应。

如果核反应的时标（即核反应的燃料消耗

掉一半左右的时间）很短，内部的物质就会在很短的时间内被加热，热量来不及转移到恒星外层，此时恒星内部将绝热膨胀。更进一步，如果核反应的时标短到同恒星物质自由坠落的时标（即恒星表面的物质在恒星自身的强大引力作用下自由落体坠到恒星中心的时间）大体相同时，恒星就来不及调整自身的结构而发生猛烈的爆炸。这时，核反应就会爆炸式地进行。相反，如果核反应的时标远长于自由坠落时标，那么，虽然这种反应是迅速，恒星却仍有足够的时间调整自身的结构，维持着自身的力学平衡，而不会发生整体的爆炸。

核反应会不会成为爆炸式的，取决于恒星内部的条件，即中心温度和中心密度。对于碳燃烧核反应而言，如果中心温度达到10亿度，密度超过1吨/厘米^3（密度只超过100千克/厘米^3，则温度要求在20亿度以上），这时的碳燃烧反应就会极为迅速地进行而成为爆炸式的热核反应了。上述条件若不满足，碳燃烧将比较平衡地进行。如果恒星中心的密度保持低于100千克/厘米^3，而温度却上升到20亿度以上，这时氧原子核之间的聚变反应就开始“点火”，形成硫、磷、硅、镁等原子核。然而，一旦温度上

升到35亿度以上，密度增加到100千克/厘米^{3}乃至1吨/厘米^{3}以上时，氧燃烧也会变成爆炸式的核反应，而且比爆炸式的碳燃烧反应更为激烈。

对于中等质量的恒星，碳燃烧或者氧燃烧终将发展成为爆炸式的核反应，从而引起心向外的急剧爆炸。像地面上氢弹爆炸一样，恒星核心的爆炸将产生一个极为强大的冲击波，在一刹那的瞬时间，向外穿过没有核反应的恒星外区域，使恒星外的气体密度、压力和温度迅速增加并点燃了那里的氢、氦以及碳、氧等等元素的热核反应，这就更加剧了恒星的不稳定，导致恒星的大规模爆发。这种大规模的爆发就是我们观测到的超新星爆发（还有另外一种超新星爆发）。作为爆发的结果，恒星的绝大部分物质将被抛向宇宙空间，而其核心部分将残留下来，形成一个中子星。

大质量恒星灾难性的毁灭

对于质量大于太阳20倍以上的大质量恒星，体积要比太阳大得多，但内部的平均密度反而不算太高。这些大质量恒星的内部，碳、氧燃烧等核反应虽然在迅速地进行，但并没有达到爆炸的程度，恒星仍处于稳定状态。核反应的迅

速进行，使碳、氧等元素很快耗尽。随后，在二三十亿度的高温下，形成了以铁为主的核心。此后，由于没有进一步的有效热核反应提供能量，核心部分顶不住恒星外层的重压，因而将迅速地收缩。由于恒星的质量很大，引力很强，这种收缩过程进行得很快，释放的引力能除了一部分向外辐射以外，另一部分将使核心物质急剧地加热，中心温度很快地达到50亿度以上。这时，已经逃脱了碳、氧爆炸性核反应的恒星整体却因为下述两个原因招致了更为不幸的灾难。

①当温度超过50亿度以上时，恒星内部充斥着高能的γ光子，在这种高能光子的轰击下，铁原子核便很快地碎裂成为许多α粒子（氦核）、质子和中子。此外，铁原子核还可能同其它元素聚变而转化成一系列更重的元素。但是，所有这些核反应都是吸热反应而且它们以极快的速度进行，一下子吸收了恒星内部大量的热能，使得核心内部在一刹那间冷却下来。这样，恒星内部的气体压力就急剧地下降，它不再能抵抗住引力，整个恒星几乎只有向中心的引力，因而将毫无阻挡地向中心坠落。这种整体向中心坠落的过程称为引力坍缩。

②在温度高达50亿度以上的情况下，一对

高能γ光子能够很快地相撞而转化为电子、正电子对，即

$$\gamma+\gamma\rightarrow e^{+}+e^{-}$$

因此，在恒星内部不仅充斥着大量高能γ光子，而且存在大量高能电子和正电子。这时，恒星内部将迅速地通过一些基本粒子间的反应产生大量中微子和反中微子。由于中微子同其它物质的相互作用非常微弱，它们将几乎不受阻挡地飞出恒星，同时带走大量的能量。这样，恒星内部的温度也将迅速地下降，最终导致恒星整体的坍缩。计算表明，在50亿度以上的温度下，中微子过程的作用甚至大大超过铁原子核吸热反应的作用，成为恒星引力坍缩的主要原因。

大质量恒星的引力坍缩是不可避免的。然而，坍缩是一种内爆过程，它会伴随着爆发现象吗？就中等质量的恒星来说，核心的爆炸式核反应产生了一个强劲的向外冲击波，使恒星外物质爆向宇宙空间，形成超新星爆发。大质量恒星又会怎样呢？

研究表明，当恒星以极大的速度收缩时，从外部急剧坍缩进来的物质碰到内部的坚硬核心后会产生反跳，形成向外的冲击波。另一方面，向外辐射的中微子同恒星外壳物质也有相互作

用，强大的中微子流产生了一种类似光压一样的中微子辐射压，施加在恒星外壳上。这两种因素的联合作用将可能使坍缩恒星的外壳爆向宇宙空间，形成超新星爆发。

大质量恒星的超新星爆发也和等质量恒星一样，爆发后将留下一个残骸。由于大质量恒星的质量大，引力强，爆发后的残骸可能不是一个中子星，而是一个黑洞。

以上，我们描述了恒星的衰亡和超新星爆发，我们了解得最清楚的是恒星演化的燃烧（质子一质子反应和碳一氮一氧循环）阶段和紧接着这一阶段的氦燃烧阶段。恒星一生的绝大部分时间是处于这两个阶段。对于氦燃烧阶段以后的演化，我们只能说有了大概的线索，进行了粗线条式的描绘。大量的细节问题我们还不了解，详尽的计算也还没有完成。也许，某些环节是不正确的或者不完善的。这需要进一步地研究，然而，从目前的认识和所掌握的观测资料来看，我们描绘的图像基本上是符合客观实际的。总起来说，小质量恒星可能以相对平稳的方式演化到白矮星；中等质量的恒星以超新星爆发的形式演化到中子星；而大质量恒星则通过超新星爆发以黑洞形式了结其漫长的一生。

白矮星露面

惊人的密度

1834 年，一位天文学家注意到天空中最亮的恒星——天狼星的运动比较奇特，它在空间的路径弯弯曲曲，不像通常的恒星总是沿着一条直线均匀地运动。这位天文学家立即预言，天狼星近旁一定存在着另一颗看不见的伴星，它与天狼星互相绕转。根据观测资料和万有引力定律，人们很快计算出这颗伴星的位置。

1862 年，天狼星的这颗伴星终于在望远镜里被找到了。它比天狼星暗 10 个星等，即亮度暗 1 万倍。然而，令人惊讶的是，它的密度高得出奇，达到 1 吨/厘米^3。如此高的密度，当时人们简直不敢相信，即便是今天，也会对此感到惊诧。其实，只要做一个简单的计算就会对天狼星伴星的高密度深信不疑。天狼星伴星的质星为 0.98 太阳质量（太阳质量为 2×10^{33} 克），半径为太阳的 87.4 分之一（太阳半径约 70 万公里）。由此不难算出它的密度。

不过，天文学家是怎样知道天狼星伴星的质量和半径的呢？

测量恒星的质量是一件极为困难的事。然而，对于双星来说，我们可以根据开普勒第三定律比较准确地定出两颗星的质量。天狼星和它的伴星正好是一对双星，这就为测定它们的质量提供了可靠的途径。

通过较长时间的观测，我们比较准确地定出天狼星双星的绕转周期为49.9年，它的轨道半长径在地球上的张角为7″.62。天狼星到我们的距离为8.8光年（1光年＝0.95×10^{18}厘米），由此不难算出轨道半长径。

那么，怎样求天狼星伴星的半径呢？这也不困难。我们知道，天狼星是一正常的主星序，它的表面温度大约为9600度（光谱型为A1），颜色发白。伴星虽然暗得多，但是在光谱、颜色和温度方面，它却处处要同其明亮的伴侣相媲美：相似的光谱型，同样的发白，而且表面温度还比主星更高一些，约为11,600度。根据物理学原理，如查两星的表面温度相同，那么它们每1平方厘米的表面积向外辐射的能量是相同的。温度愈高，每1平方厘米表面积辐射的能量愈多（与温度的四次方成正比）。由此可知，天狼星伴星每1平方厘米表面积向外辐射的能量反而比主星要多两倍。我们知道，天狼星的视星等是一

1.45 等，伴星只有 +8.68 等。天狼星比它的伴星亮 10 等，辐射出的总能量比伴星多 1 万多倍。表面温度较高的伴星反而暗弱得多，造成这种现象的唯一原因只能是伴星的表面积比主星小得多。因而它辐射的总能量就比主星少得多。由此可以推断出主星的表面积比伴星约大 24000 倍（球体的表面积同半径平方成正比），所以天狼星的半径是伴星的 154 倍。同样，利用天狼星的光度和表面温度同太阳进行比较可以推知天狼星的半径是太阳半径的 1.76 倍。最后，我们求出天狼星伴星的半径为太阳半径的 87.4 分之一，大约 8000 公里，比地球的半径略大一点。

天狼星伴星发现以后，天文学家又发现了一批与其性质类似的恒星，它们的质量同太阳差不多，体积却同地球差不多或者更小，密度极高，最高的可达 1 立米厘米几十吨。这类恒星的表面温度大约 1 万度，颜色发白。它们的“个子”小，仿佛是恒星世界中的矮子，而颜色又发白，因此被命名为白矮星。由于白矮星体积小，光度低，因此很难发现。迄今已发现了 1 千多颗白矮星，但理论上推算，全部恒星中大约 10% 应该为白矮星。

白矮星的结构

白矮星的密度为什么这么高？卢瑟福发现了原子结构以后，秘密也就被揭开了。大家知道，地球上所有的物质都是由各种不同的原子组成的。一个原子的体积非常小，半径只有亿分之一厘米（10^{-8}厘米），原子又由原子核和若干个电子组成。带正电的原子核对带负电的电子有强大的库仑引力（同距离平方成反比），使得电子绕着原子核高速旋转，如同地球、行星绕太阳旋转一样。原子核又由若干个带正电的质子和不带电的中子组成，而质子和中子的质量大约都是电子质量的1800多倍，因此，一个原子的质量几乎全部集中在它的核里。但是，原子核的半径只有10^{-13}厘米，为原子半径的十万分之一，由此计算就会发现，原子核的密度竟高达每厘米^{3}1亿吨以上。了解了原子的这种结构，我们就不难理解白矮星同通常恒星（如太阳）物质密度之间的巨大差别了。

我们知道，在地球表面1个大气压的压强下，铁的密度为7.9克/厘米^3。与此相应，铁原子核之间的距离等于2.8×10^{-3}厘米。也就是说，铁原子之间几乎是紧挨着排列的。然而，在太阳内部，温度和压力都很高，原子全部都电离

了。在强大的压力（太阳中心的压强为 3.4×10^{16} 帕斯卡）下，原子核之间的距离被大大压缩，达到 4×10^{-9} 厘米。由于原子核挤得很紧，物质密度便大大增加，太阳中心为 160 克/厘米^3。至于白矮星，情况更为特殊。白矮星内部的压力比太阳内部还要大几百万倍。在这种情况下，原子被压碎了，原子核之间的距离被压缩到一百亿分之一（即 10^{-10} 厘米）。因此，白矮星的密度也就大得惊人，每厘米^3 高达几十公斤甚至几百吨。

白矮星体积很小，质量却与太阳差不多。按照万有引力定律，引力的大小与距离的平方成反比。可以想像，白矮星物质之间的引力一定非常强。正是由于白矮星内部的巨大压力顶住了它的引力，使白矮星成为稳定的恒星。那么，白矮星内部异乎寻常的压力又是怎样产生的呢？

简并电子气

我们知道，恒星内部的压强主要是由于自由电子的热运动造成的（这是因为原子核的质量比电子质量大得多，所以热运动速度要小得多，贡献的压强也要小得多）。恒星的密度愈大，每厘米^3 内的自由电子数目就愈多，宏观上产生

的压强也愈大。此外，如果恒星的温度愈高，热运动速度愈大，不仅相互撞击的频率愈大，而且每次撞击时所造成的推动力也愈大，因而所引起的压强也愈大。这种电子气体同通常的理想气体相类似，气体的压强同物质密度与温度的乘积成正比。太阳内部的压强就是上述原因造成的，这种压强称为电子气体的热运动压强。太阳和通常恒星的内部进行着热核反应，它放出的能量维持住内部物质的高温状态，也就是持住抵抗引力的热运动压强，因为整个星体能够处于平衡状态。

然而白矮星的情况却大不相同。前一节已经提到，白矮星是临近死亡的恒星，从恒星演化的角度来看，白矮星只是一具恒星尸体。白矮星内部的温度远低于太阳内部，通常只有几百万度甚至几十万度，核反应一般不能进行，因而没有提供热量的能源。仅仅靠热运动压强抵挡不住强大的引力。白矮星是靠别的压强来支撑的。关键仍然在于白矮星的高密态。理论研究表明，当物质密度高到一定的程度以后就会出现一种新型的而且更加强大的压强——电子气体的“简并”（或称“退化”）压强。这种压强只与密度有关，即使在绝对零度下，它也存在，而且不

减弱，足以用来支撑住整个白矮星使其不致于冷却而坍缩。

什么是电子气体的简并压强呢？要理解这个问题，不得不从电子气体的微观量子力学性质说起。

按照经典物理学的观点，一个自由粒子的状态是由它所在的空间位置和它的速度矢量 v（或动量 $\rho = mv$，m 为粒子的质量）来确定的。位置和速度是互相独立的，而且能够连续地改变。因此，我们可以明确指出某个粒子具有什么样的位置和速度，就是说，处于哪个确定的状态。另一方面，每个粒子可能有的状态是无穷多个。然而，按照量子力学理论，对于微观的全同粒子（彼此不可分辨的同一类粒子）来说，我们不能指出某一特定粒子处于哪一个状态，只能说出有多少个粒子处于某一个微观状态。同时，粒子中能具有的状态（称为量子态）数目不是无限大，而是有限的。对于像电子、质子、电子这样的所谓费米子，如果它们的动量值在 0 到某个 P_0 范围内，那么，单位体积内粒子可能具有的量子态数目等于$\frac{8\pi}{3} \cdot \frac{\rho_0^3}{h^3}$，h 是一个微小的量，等于 6.63×10^{-34} 焦耳 • 秒，称为普朗克常数。按照一般的物理规律，物质系统总是倾向于使得本

系统具有最小的总能量。另一方面，对于电子这样的费米子，量子力学里有一条定律——泡利不相容原理，即每个微观量子态最多只能被一个粒子（费米子）所占据。当然，一个量子态上可能没有粒子，但不允许同时有两个以上的粒子。

现在我们来讨论电子组成的系统。假定温度接近绝对零度，因而没有热运动，最低的量子态就是能量为零的态。按照前一条规律，电子都倾向于占据低能量状态；而按照泡利不相容原理，每个态最多只能有一个电子。因此，必然的结果是，电子占满了能量从最小值（即 0）到某个最大值 E_f 为止的全部状态。E_f 称为费米能量，与它相对应的粒子速度和动量分别称为费米速度（υ_f）和费米动量（P_f）。按照前面关于量子态数目的计算，能量从 0 到 E_f（对应地，动量从 $0P_f$）的全部量子态数目等于 $\frac{8\pi}{3} \cdot \frac{P_f^3}{h^3}$，这也就是单位体积（厘米^3）内的电子数目 n，

即 $n = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{P_f^3}{h^3}$

或者 $$P_f = (3n^2)^{1/3} \cdot \frac{h}{2n} \cdot n^{1/3}$$

从这里我们立刻可以看出经典物理理论和量子力学的巨大差别。按照经典理论，在绝对零

度时，所有电子的热运动都停止了，动能、动量和速度都等于0。但按照量子力学，电子的能量、动量和速度不等于0，而是分布在0到E_f、0到P_f和0到υ_f之间。E_f、P_f和υ_f的数值取决于数密度（1厘米^{3}内的电子数）n，n越大，P_f、u_f和E_f就越大。我们可以形象地表示出上述量子力学图像。取电子动量P的三个分量P_x、P_y和P_z的座标轴，以P_f为半径画一个球，称为费米球，以一边长为h的小立方体A′来分割球体，整个费米球内包含$\frac{4\pi}{3}\cdot\frac{P_f^3}{A^3}$个小立方体。由于电子自身在旋转，而电子的旋转可以取两个不同的方向，因此代表了两个不同的量子态。这样，我们可以容许每个小立方体内包含两个量子态，整个费米球包含了$\frac{8\pi}{3}\cdot\frac{P_f^3}{A^3}$个量子态。当电子气体处于绝对零度时，按照前面所述，电子就会按其动量全部填满费米球，每个小立方体两个电子，在费米球外则一个也没有。电子气体的这种状态称为完全简并（或退化）状态。

绝对零度只是一种理想情况，实际上是达不到的。现在我们设电子气体的温度为T，在这种情形，每个电子平均来说可以分配到的热运动能量约等于kT，k$=1.38\times10^{-23}$焦耳/度，称为玻尔兹曼常数。先讨论kT$>E_f$，即热运动能量大于费米球的情形。由于费米球外有很多很多量子这些量子态都空着，没有被任何

电子所占据，而电子如果获得能量 kT，它的总能量就大于 E_f。因此，实际上，费米球内的所有电子几乎都会得到热运动量 kT 而跑到费米球外，参与热运动。在这种情形下，热运动就是主要的因素，支撑恒星的压力靠热运动来提供。然而，如果 $kT<E_f$，情况就大不相同。这时，对于费米球内能量较小的电子来说，它们不可能获得热运动能量，因为，即使它们得到了 kT，其能量仍可能小于 E_f，而在那里的量子态上已经有了别的电子，它们不能去占据那些量子态。只有能量接近 E_f 的那些电子才可能获得热运动能量而跑出费米球，参与热运动。因此，大部分电子留在费米球内，少部分电子跑出费米球，这种状态称为部分简并状态。在这种状态下，由于参与热运动的电子很多，热运动提供的压力就很不重要。大多数电子虽然不参加热运动，但由于费米能 E_f 很大，它们的能量（或动量）平均来说是很大的，这些电子的运动提供了很大的压强。

条件 $kT=E_f$ 可以改用密度 ρ 表示

$$\rho_0=2.4\times10^{-3}T^{3/2}$$

当 $\rho<\rho_0$ 时，电子气体不简并，可以不考虑量子力学效应，即不考虑费米球的影响。此时，压力由电子的热运动提供。取 $T=10^7$ 度，则 $\rho_0\approx760$ 克/厘米^3。太阳的密度只有 160 克/厘米^3，因此，完全不需要考虑量

子效应。对于白矮星，若取 T＝10^6 度，则 ρ_0 也只有 24 千克/厘米^3，远远小于白矮星的密度。因此，白矮星里简并电子气体的压强起着决定性的作用，热运动的作用将微不足道。由于主能很大，简并电子压足以维持白矮星的平衡，使它能抗衡引力而不致于坍缩。

质量极限

简并电子气体的压强虽然很大，但它的威力仍有一定的限度。详细的计算表明，简并电子提供的压强正比是 $n^{5/3}$。随着电子数密度 n 的增加，简并压强也增加，但增加的速率并不太快。当恒星的质量很大时，简并电子压也不足以抵抗引力。因此，白矮星的质量有一个上限，大约为 1.4 倍太阳质量。这个结论首先由美籍印度天体物理学家张德拉塞卡得提出，白矮星的质量上限因此而称为张德拉塞卡极限。张德拉塞卡在白矮星方面的出色研究工作以及其它方面的工作使他荣获了 1983 年诺贝尔物理奖。

脉冲星和中子星

射电天文学的辉煌成就

早在 30 年代初期，在中子刚发现不久，朗道、奥本海墨等几位著名科学家就先后预言并

研究了完全由中子所组成的致密星，这是一种半径非常小（只有10—20公里），而密度比白矮星还要高几百万倍以上（10^{13}—10^{14}克/厘米^3）的特殊天体。人们推测这些中子星可能就是超新星爆发的残骸。到了五六十年代，随着恒星演化研究的进展，在探讨晚期大质量恒星最后引力坍缩的同时，人们大大加强了对中子星的研究，并试图直接从宇宙X射线的观测去寻找这种中子星，所有当时能够想象得到的方法都去用于搜索中子星，但相继均告失败。

“踏破铁鞋无觅处，得来全不费功夫”。1967年10月，英国的天文学家利用剑桥大学射电天文台的一架大型射电（即无线电）望远镜完全偶然地在天空中发现了一个奇怪的“快速脉冲射电源”。它的射电辐射是脉冲式的，每隔1.337秒发出一个脉冲电讯号，其周期非常准确而稳定，接着又发现了几十个这样的快速脉冲射电源。到目前为止约发现380个这类天体，它们不仅射电脉冲周期很短，而且周期都非常稳定，在一年之内的变化（逐渐变化）不超过百万分之一秒，甚至比一个标准的原子钟还要准。这是一种完全新型的天体，称为射电脉冲星，简称脉冲星。脉冲星的发现天文界和物理界引起了轰动，

吸引了大批天文学家和理论物理学家，成为60年代天文、物理界最重要的成果之一。脉冲星发现者之一的赫维希也由此而荣获1974年诺贝尔物理奖。

绝大多数脉冲星只发出射电脉冲辐射。只有两颗脉冲星即蟹状星云脉冲星PSR0531和船帆座脉冲星PSR0833（PSR为脉冲星的英文名Pulsar的缩写，数字代表该脉冲星在天球上的坐标），找到了光学对应体，光学辐射也是脉冲式的，脉冲周期同射电辐射一样。另外PSR0531是目前唯一已知的从射电、光学直到X射线和γ射线各个电磁波段都能观测到脉冲式辐射的脉冲星，也是目前已知年龄最小的脉冲星，周期为0.033秒。

“脉冲星”只是就其辐射的面形式所取的名字。它的本质究竟是什么呢？它和本节开头所说的中子星又有什么关系呢？

高速旋转的中子星

脉冲星发出周期极为准确的脉冲辐射，意味着那里一定进行着某种准确的周期运动。天文研究告诉我们，天体上的准确周期运动只有二种，一种是自转，一种是脉动。天空中有一种变星，称为脉动变星，它们像心脏那样不停地胀

缩，使得它们的亮度也在周期性地变化。还有一种就是双星那样的互相绕转。问题是由什么样的恒星来自转、脉动或绕转，才能发出周期极短的脉冲。

因脉冲星的射电脉冲既短促又强烈，由此便可推断出脉冲星的体积不可能很大。如果体积较大，人们观察到的脉冲就不会很短促，强度变化也不会很激烈。此外，一颗太阳那样的恒星，不管它通过哪条途径，就整体而论，都不可能发出周期的，只有几秒甚至更短的脉冲：如果它以周期只有几秒的高速自转，惯性离心力将使这颗恒星瓦解；而如果是两颗互相绕转的恒星，从开普勒三大定律不难知道，为了在几秒内绕转一周，一颗恒星必然跑到另一颗星里面去；至于径向脉动，研究表明，脉动周期大致与密度的平方根成反比。太阳那样的恒星，密度不大（每厘米^{3}低于几千克），它的脉动周期不可能小到几秒！所以，这类星是一种体积极小，密度极高的致密星。

从理论上人们目前只知道可能有两种致密星，就是白矮星与中子星。脉冲星是否可能是白矮星呢？人们最初的确曾这样猜测过，但很快就被否定了。这是因为，对白矮星的径向脉动来

说，它的密度（10^6—10^8 克/厘米^3 之间）仍然不够大，不能产生短于1秒的周期，而大多数脉冲星的脉冲周期却短于1秒。此外，两颗互相绕转的白矮星的最短绕转周期（即两颗星靠在一起时）大约是1.7秒，当然也不能解释绝大多数脉冲星的短促脉冲。白矮星的自转也同样无效，虽然白矮星的表面引力比较大，可以容许比较快的自转。是当自转周期短到几分之一秒，几十分之一秒时，白矮星表面的自转线速将接近光速，由这样的高速自转产生的惯性离心力还是远远地超过了它的表面引力，白矮星同样要分崩离析。所以，可以作为脉冲星出现的，自然只剩下中子星的唯一可能性了。

进一步分析发现，两颗互相绕转的中子星组成的双星系统，如果它的绕转周期短到1秒钟左右，那么根据广义相对论，这个双星系统的引力辐射将非常强大，以致将使这个双星的轨道运动很快减慢，周期迅速变化，不能维持周期的极端稳定性，因此这种可能性也被排除。另外，由于中子星的密度极高（相当于原子核内物质密度），它所产生的径向脉动周期在1毫秒（0.001秒）的量级，这又比较大多数脉冲星的脉冲周期短得多。唯一可能给出稳定的短促脉

冲模式是：高速自转的中子星。由于它的半径非常小，完全可以稳定地以脉冲周期自转。

“灯塔效应”

旋转的中子星为什么会发射脉冲辐射呢？太阳和一般天体是向所有方向都发射出光和各种电磁波，地球或宇宙飞船无论在太阳哪一方，都可以观测到它发射出来的光。脉冲星的脉冲式辐射，自然使人们推断它同太阳发光大不相同：辐射必定是来自旋转中子星上面一个比较小的区域内（而且这一区域并不在中子星自转轴的南、北两极区），而其它地方却没有辐射发出。这样，随着中子星自转，当上述小区域发射的光正好扫过地球时，我们就可以看到它发出来的光。一直到中子星又转了一圈，这束“光”再扫过地球的时候，我们又看到它。这样，精密的射电望远镜接收到的辐射就是均匀间隔的脉冲形式。这好象是脉冲星上有一个发光的灯塔一样，因而称为灯塔效应。当然，如果中子星高速旋转时灯发出的光不扫过地球，我们就不可能发现它。

灯塔效应是怎样产生的？也就是说，为什么脉冲星的辐射只能从一个比较小的区域发出？要说明这一点，让我们来看一看脉冲星表面的

情况和脉冲星辐射的性质。

首先，各种观测资料都说明，脉冲星像一个巨大的磁铁，表面的磁场强度非常高，达到10^{12}—10^{13}高斯（注意，地球表面磁场只有0.5高斯），这个结果同理论上的预言是一致的。其次，在脉冲星表面上不断地产生许多高能的电子。这两个因素合在一起就产生了灯塔效应。

在脉冲星具有极强磁场的情况下，高能电子可以以两种方式发出辐射。一种方式是，高能电子只能绕着磁力线作螺旋运动，在这个过程中发生辐射。这种类型的辐射首先是在同步加速器中发现的，因而称为同步加速辐射。它的特点之一是辐射只能沿着做螺旋运动的电子的运动方向。第二种方式是，由于脉冲星磁场很强，磁力线弯曲得很厉害，当电子绕着这种变的磁力线运动时也会发出一种辐射，称为曲率辐射。大多数天文学家认为，我们接收到的脉冲星辐射就是这两种辐射，在射电波段是曲率辐射，而在X和γ射线波段则是同步加速辐射。

脉冲星的强磁场中，只有极区的磁场是开放的，极区产生的高能电子可以沿开放磁场往外运动，并通过上述的两种辐射方式迅速减小其能量。在这种情形下，高能电子的辐射只能沿

着磁轴方向为中心的顶角——一个不很大的圆锥——发射出来，好象手电筒或探照灯的光锥一样。一般来说，中子星的磁轴和自转轴并不重合，因此，当中子星绕其自转轴旋转时，磁轴也绕自转轴旋转，这样，上述发光的圆锥也整个地绕着中子星自转轴旋转。如果地球位于光锥能扫到的地方，地球上就可以接收到脉冲星的辐射。脉冲星转一周，光锥也扫过地球一次，因而地球上就接受到脉冲式的辐射，脉冲的周期就是脉冲星自转的周期。

然而，还有一种理论，它认为，辐射不是从磁极方向附近的锥体发出的，而是从与磁轴垂直的“磁赤道”平面附近的窄小区域发出的，这样地球也可以接收到脉冲信号。不同的是，中子星每旋转一次，它给出两次脉冲，这种理论称为“刀片”模型。

“灯塔”究竟是在磁极附近还是在磁赤道附近？这个问题尚无定论，目前仍在争论和研究之中。

光速圆柱面

中子星外层的气体处于等离子体状态，它们同强磁场“冻结”在一起，组成了一个“磁层”。由于中子星在旋转，它的磁力线以及同磁

力线冻结在一起的等离子体都绕自转轴做刚性旋转，称为共转。我们知道，物体做刚性旋转时，任一点的旋转线速度都等于旋转角速度乘以到自转轴的距离，因此，距离越大，旋转线速度也越大。这样，只要离自转轴足够远，那里的旋转线速度就会达到光速。而按照狭义相对论，物质的速度是不能超过光速的，因此，中子星外层的等离子体和磁力线只能在离自转轴一定距离内才能刚性地旋转。在此距离外，等离子体就不能做刚性旋转，也不可能同磁力线共转。转动线速度等于光速的界面称为光速圆柱面。

光速圆柱面附近物质的行为是很复杂的，至今尚未研究得很清楚。有一些迹象表明，脉冲星的辐射区域（灯域所在地）是在光速圆柱面附近。然而，另一些迹象却倾向于灯塔位于中子星表面。究竟灯塔位于何处，现在还不能下结论。

尽管如此，但可以肯定的是，中子星脉冲辐射的能量不是由其内部的核反应提供的。唯一可能的能源就是中子星的转动能。因此，由于中子星不断地向太空辐射，它的自转速度应逐渐变慢，也就是，周期缓慢地变长。对脉冲周期的长期检测证实了这一点，全部脉冲星的周期都在极其缓慢地增长。

内部结构和星震

中子星的半径只有 10—20 公里，平均密度却高达 10^{13}—10^{14} 克/厘米^3，可以想象，中子星的结构一定很奇特。

中子星表面也有一层大气，不过其厚度只有几米到几十米，从外往里，大气的密度从 1 克/厘米^3 迅速增加到 10 千克/厘米^3。大气以外有一个延伸几百公里远的“冕”，密度极低。大气和冕都由等离子体组成，在光速圆柱面以内，大气和冕的等离子体与磁场冻结在一起，绕中子星自转轴共转。

大气以内是一个非常坚硬的固体壳层，厚度只有 1 公里左右。在壳层里，原子核像晶体那样紧密排列。中子星固体壳层可分为两层，外层主要由原子核和自由电子组成，密度由 10^{4}—10^{11} 克/厘米^3。内层除了原子核和自由电子外，还有许多自由中子，密度超过 10^{11} 克/厘米^3。

壳层再往里，密度越来越高，达到了原子核密度（10^{13}—10^{14} 克/厘米^3）。这时，原子核彼此挤在一起，其界限完全消失，这一层的物质几乎都是自由中子，而且中子“流体”处于超流状态。这一层占了中子星质量的绝大部分。可以说是

中子星的主体。

中子星最中心部分是一个密度高达 10^{15} 克/厘米^3 的核心，半径大约为 1 公里。人们至今没有搞清楚这一核心区域的物态。从理论上分析，它可能是由中子组成的晶体，或者是所谓“n 凝聚”的特殊物质，也可能由夸克这种基本粒子所组成。

中子星的内部结构完全是理论上的结论。有没有一些观测现象同它相关呢？有一些，但不多，比较重要的是所谓自转突快现象。

脉冲星的自转都在缓缓变慢，也就是周期在缓慢地变长。然而，对于两颗年轻的脉冲星 PSR0531（蟹状星云脉冲星）和 PSR0833（船帆座脉冲星），却好几次观测到它们自转突然加快，突快以后，自转又缓慢地变慢。这种自转突快的大小虽然只有周期的百万分之几，但对于原来极稳定变慢的脉冲星来说，已经是件非同一般的大事了。

两个年轻的脉冲星为什么会有自转突快现象？现在认为，这与中子星的内部构造有关。突变的原因可以使中子星的固态壳层突然断裂，导致中子星结构的重新调整，从而半径减小，自转加快。这有点像地球上的地震一样，不过，星

震的相对规模要大得多。星震发生在中子星的外壳。而另外一些人却认为，自转突快的原因应该到更深层即超流中子区去寻找。

中子星与超新星爆发

中子星是中等质量恒星演化到晚期经过超新星爆发后留下来的残骸。这个理论虽然还有许多问题尚待解决，但总的框架已被人们接受。超新星爆发时还会爆出大量气体，形成的星云（如蟹状星云），称为超新星遗迹。目前，在银河系里已经发现了130多个超新星遗迹。如果中子星的确是超新星爆发的产物，我们自然会要求脉冲星位于超新星遗迹里面，起码也应该在超新星遗迹近旁。实际观测结果怎样呢？

迄今为止，只观测到两颗年轻的脉冲星即蟹状星云脉冲星和船帆座脉冲星位于超新星遗迹中心（前者）或边缘（后者）。为什么其它所有的脉冲星与超新星遗迹没有明显的联系呢？这个问题长期使天文学家困惑不解。

70年代末期以来，长期的观测为解决这个问题提供了线索。人们发现，脉冲星有很高的空间运动速度，平均达200公里/秒。这么高的速度从哪里来？无论什么原因，总之是在脉冲星诞生时就有了。天文学家设想，超新星爆发时可能

不是完全径向的坍缩，这样，脉冲星形成后就得到了一个反新星爆发时要抛出大量的物质，因而双星系统就瓦解了，刚诞生的脉冲星获得一个很大的速度。这样，经过较长一段时间后，脉冲星就离开超新星遗迹很远了，看上去两者就没有什么关系。

在中子星同超新星的关系方面还有一个问题，从现有300多个脉冲星的资料可以推断脉冲星在银河系里的分布，从而得出银河系里脉冲星的总数。如果又知道了脉冲星的年龄，两者相除就可以求得脉冲星的产星率，即银河系每年平均产生多少个脉冲星。对超新星遗迹也可以做类似的工作。结果表明，银河系里大约每50—100年产生一颗超新星。但脉冲星的产星率较高，有人估计大约每20年一颗。这就提出一个问题，中子星全部都是由超新星产生的吗？虽然计算中有些疑难之处还有待研究，但这个问题确是值得深思的。有人认为，白矮星也可能是中子星的来源。如果白矮星在吸积物质，其质量最终超过了张德拉塞卡极限，它就可能进一步坍缩而形成中子星。

毫秒脉冲星

1982年发现了一颗不同凡响的脉冲星，它

的奇特性质引起了天文学家的关注，这颗脉冲星称为 PSR1917＋214，其脉冲周期到 1.56 毫秒。

首先，这颗毫秒脉冲星的周期极短，表明它转得很快，其赤道上的线速度达到光速的 0.13 倍，这样的转速已接近自转稳定性的极限。当星体自转产生的离心力与引力平衡时，就达到了自转稳定的极限。自转得太快，超过了这个极限，引力就不可能将物质束缚在一起，星体就会瓦解。如果星体的密度为 ρ，从引力与离心力平衡可推出最短的自转周期为

$$\rho_{min}=\left(\frac{1.4}{\rho^{14}}\right)^{1/2}\text{毫秒}$$

ρ^{14} 为以 10^{14} 克/厘米^3 为单位的星体密度。如果取脉冲星的平均密度为 2×10^{14} 克/厘米^3，则 $\rho_{min}\doteq$ 0.8 毫秒。可见 PSR1917＋214 已十分接近这一极限了。

其次，这颗脉冲星的周期虽然在缓慢地增长，但增长率却十分小，只有 10^{-19}。这使得它成为目前已知的最准确的钟，其精确度比最好的原子钟还要高 10^5 倍。PSR1917＋214 的周期只有蟹状星云脉冲星的 $\frac{1}{20}$，似乎说明它应该是很年轻的脉冲星。其实不然，根据它的周期和周期

增长率可以算出它的年龄大约为 2×10^8 年，可见是一颗相当老的脉冲星。

另外，按照目前流行的磁偶极子模型可以算出 PSR1917＋214 的表面磁场只有 4×10^8 高斯，比通常的脉冲星磁场弱了 1 万倍以上。这什么它的磁场如此反常地弱呢？

还有一些其他的特征。这异乎寻常的毫秒脉冲星的发现在天文界引起了轰动。为了解释观测资料，探讨其起源和演化，天文学家们提出许多种模型，一时众说纷纭。虽然现在看来还没有一种模型能完满地解释观测资料，但有一点是肯定的，即必须离开通常的标准脉冲星模型。1983 年又发现了一颗毫秒脉冲星，它的周期略长一点，为 6.1 毫秒，是一个双星的成员。还有更多的毫秒脉冲星吗？天文学家正期望如此。

奥本海墨极限

白矮星有一个质量极限——张德拉塞卡极限，中子星的质量是不是也有限制呢？同白矮星一样，我们也必须从中子星内部的压力情况来看待这个问题。

正常恒星内部的气体热运动产生了对抗引力的压力，使星体平衡。对白矮星来说，气体热运动的压力已不足以抗衡引力，而必须依赖简

并电子气体的简并压力。中子星的密度比白矮星还要高许多倍，而半径却要小几百到几千倍，不难想象，中子星的引力比白矮星一定强得多。在中子星内部，气体热运动产生的压力与引力相比是太微不足道了。另一方面，虽然中子星内部的电子像白矮星一样是简并的，它可以提供很大的压力，但是，中子星内部的电子数并不多，仅在外壳和大气里有一些电子，内部却几乎没有。因此，电子的简并压力不是抗衡引力的主要因素。

在中子星内，抗衡引力的主要因素是中子的压力。中子像电子一样，也是费米子。因此，我们可以用与上节讨论白矮星压强的方法同样地讨论中子星内部压强。中子星内部的密度达 10^{13}—10^{14} 克/厘米^3，对应的中子数为每厘米^3 有 10^{37}—10^{38} 个中子。由此可推知中子星内部中子的费米能约 10—100 百万电子伏特。即使在 5 亿度的高温下，中子星内部中子的平均热运动能量也只有 0.05 百万电子伏特，可见这个能量相当大。正是中子的简并压强提供了抗衡中子星引力的压力，使中子星处于平衡状态。与白矮星完全类似中子星内中子的简并压强也有一定的限度，这使得中子星的质量有一个上限，称为

奥本海墨极限，其值大约为2倍太阳质量。如果一个致密天体的质量超过中子星质量极限，中子的简并压不足以抗衡引力，这个天体就不可能是一颗中子星，当然更不可能是一颗白矮星。

天上的核电站

我们还不能准确知道，补偿恒星辐射的能源方式是否就是核反应。虽然现在还没有发现其他产能率更高的能源，但这并不能排除还有其他能源存在的可能性。也许未来的物理知识能够帮助我们找到至今还不知道的某种产能机制，即找到像某种科学幻想小说家所预言的能源？

核物理学家最近已清楚地向天文学家解释了恒星辐射的原因。但是在本世纪 20 年代的初期，物理学家还不相信在恒星内部会发生核反应！这和原子的结构有关系。

原子核

世界上所有的物质——岩石或

矿物，空气或大海，动植物的细胞，以及宇宙中的气体星云和恒星——最终都是由 92 种化学元素所组成。这个在 19 世纪业已获得的知识使我们对物质认识大大简化了。到本世纪，我们又可以指出，92 种化学元素最终是由三种类型的基本物质所组成，它们是：质子、中子和电子。如氦原子和碳原子的不同之处只不过在于它们是由不同数目的三种基本物质所组成的。

氦原子核是由两个质子和两个中子所组成。质子是带正电的粒子，因此氦原子核是带正电的。围绕着氦原子核有两个带负电的轻粒子，两个电子。它们形成了氦原子的电子壳层。碳元素的结构较为复杂一些，它的原子核也是由质子和中子所组成，它的质子是 6 个，中子也是 6 个。但是，在外部的电子壳层中还有 6 个电子围绕着原子核运动。这里最简单的原子是氢原子，它的核由一个质子组成，有一个电子围绕这个质子在不停地运动。

质子和中子的质量大致相同。虽然和我们习惯的重量相比较，它们的重量是无法估量出来的，但人们叫它们为重粒子。假如可以把一万亿个这样的重粒子放到一个天平上去称，那么它们的总重量大约是一克的一万亿分之一。电

子的质量大约是质子质量的两千分之一。质子带的是正电，电子带是负电，当质子和电子在一起时，它们正好呈电中性。有时还会出现一种粒子，它的质量和电子的质量相同，但它是带正电的。这种粒子就是正电子，不过正电子的生命很短。当它飞过电子的近旁时，就会和电子立即合并。电子和正电子湮没时会发射出一个光子。

所有的原子核都是由一定数目的质子和中子所组成。通常原子核中有多少个质子，它的外部就有多少个电子在围绕着它运动。从而使原子核中质子所带正电荷正好被电子所带的负电荷所中和。实际上，人们还可以更简单地认为，物质世界不是由三种基本物质即质子、中子和电子所组成，而是由两种基本物质组成。由于在原子核内质子可以和电子聚合成中子，而在原子核外一个中子可以经过大约 17 分钟以后衰变为一个质子和一个电子。因此可以认为，物质世界实质上是由质子和电子所组成。原子核中的质子数与中子数之和称为原子核的质量数。而原子核的质子数称为原子序数。氢的质量数是 1，原子序数也是 1。氦的质量数是 4，原子序数是 2。常见的铁原子质量数是 56，原子序数是 26。围绕原子核运动的电子数必须和原子序

数相同，才能使原子呈电中性。电子壳层决定了元素的化学性质，所以原子序数不同的元素，它们的电子壳层不同，因而化学性质也不同。原子序数相同而中子数不同的原子，它们的质量数不同，但化学性质相同。人们称它们为同一元素的同位素，例如除了正常的氢以外，还有氢的同位素——重氢。重氢的原子核是由一个质子和一个中子组成。氢的这个同位素称为氘，在自然界中仅存在极少量的氘。

一块铁和气球中的氢气虽然区别很大，但它们都是由质子和电子组成。假如人们取 56 个氢原子，并把它们的 56 个质子和 56 个电子进行某种组合，即将其中的 30 个电子和 30 个质子组合成 30 个中子，然后再将这些中子和其余的 26 个质子组合成原子核，并且让剩余的 26 个电子围绕着这个核运动，那么人们就由氢创造出一个铁原子。

如果取 4 个氢原子，将其中的 2 个电子和 2 个质子组合成 2 个中子，然后再将它们和剩余的两个质子组合成原子核，于是就可以创造出质量数为 4，原子通讯卫星数为 2 的原子核，使得两个剩余的电子围绕着这个核运动。这样人们就可以把氢聚合成为氦，在这个过程中将有

能量释放出来，但是，原子核之间并不是那么容易发生聚变的。

恒星的能源

1926年剑桥大学著名的“普卢姆（Plume）”天文学教授，阿瑟·爱丁顿（Arthru Eddington）爵士出版了他的《恒星内部结构》一书。这在当时是一部关于恒星内部物理科学的卓越著作。爱丁顿本人曾对此领域有过重大的贡献。那时已经建立了一个关于恒星内部结构的理论，不过这个理论还缺少了一部分关键内容，即能量是如何产生的。

那时人们已经知道，氢含量很丰富的恒星物质必定是理想的产能原料。人们也知道，当氢转变为氦时将会有能量释放出来，而且释放出的能量可以维持太阳和恒星的向外辐射达数十亿年以上。因此很清楚，假如能够知道氢在什么情况下可以发生聚变，人们就等于找到一个巨大的能源。然而在当时，人们距离通过实验将氢聚变为氦还相当远。

当时的天体物理学家除了相信恒星是巨大的核电站以外，别无其他选择。因为他们想象不出还有其他的过程可以释放出这么多能量，以

补偿太阳的辐射达数十亿年。爱丁顿最彻底地阐明了这一点。当他提到观测天文学家所进行的大量的和重复的恒星亮度观测时，写道："测量核能的释放是大量天文观测内容之一。如果在我的书中不是所有都错误的话，那么我们已经相当清楚地知道，恒星物质必须在多大密度和多高温度下，才能发生这样的过程。"遗憾的是，当时的物理学家却认为，在恒星内部原子核是不可能发生反应的。

当时爱丁顿已经能估计出太阳内部的温度。太阳通过重力把它的物质聚集在一起，重力将物质拉向中心。然而太阳物质并没有简单地落到在太阳中心去，这是因为太阳的气体具有一定的压强。气体压力的作用和重力相反，它将物质向外推出，这两个力互相平衡。同样的现象也存在于地球大气中。假定没有重力，空气就会被本身的压力吹到空间中去。相反，如果没有空气压力，大气层就会落到地球表面上来。人们可以计算出吸引太阳物质的重力的大小，而和重力处于平衡的气体压力必须和它相等。气体压力和它的密度、温度有关。人们知道太阳物质的密度，因为太阳的质量和它的体积是已知的，太阳物质的压力有多大？这将取决于它的温度。气

体的温度越高，压力就越大。在太阳内部气体的温度到底达到多高才能使重力和压力维持平衡？

爱丁顿估计恒星中心区域的温度达到4000万度。这个值对于我们来说好像很高，然而核物理学家却认为，要想发生核反应，这个值是太低了。在这样的温度下太阳内部的原子以每秒1000公里的速度运动。氢原子早已失去了电子，它们的质子可以在空中自由飞行。偶尔会发生两个质子相遇，但它们带的都是正电，又互相排斥。当质子以每秒1000公里的速度运动时，两个质子虽然可以运动到很靠近，但是在达到能使它们发生聚变的距离之前，就会被电荷排斥力推开。为了使氢原子变成氦核，还必须使4个质子和两个电子，即6个粒子同时在一个地方相遇——这个可能性很小！即使6个粒子都同时飞到一起，但电荷力会使它们的运动轨道偏转而阻止聚变的发生。只有当温度达到几百亿度，使粒子以极快的速度飞行，这时虽然有电荷力的作用，但也能发生聚变。当时，物理学家们认为，太阳内部的温度只有4000万度，要想使氢聚变为氦这个温度是太低了。但是爱丁顿却坚信，恒星的能源只能是核能。他依然写道：

"我们不和那个认为恒星内部的温度过低，从而不能发生这种过程的批评者进行争论。我们只是告诉他，走吧，去找个温度高的地方吧。"实际上，他认为物理学家所预言的氢变为氦的先决条件是不准确的。他更相信恒星已具备条件并认为，物理学家应该去认识，在4000万度这样相对比较低的温度下，氢怎样才能变成氦。他的意见是正确的。

隧道效应

当爱丁顿在他的书中坚持认为恒星内部会发生氢聚变为氦的时候，似乎在这同时，物理界也受到了巨大的冲击。这个冲击来自巴黎的路易·德布罗意（Louis de Brogli），哥本哈根的尼尔斯·玻尔（Niels Bohr），苏黎世的埃尔温·薛定谔（Erwin Schroingre）以及哥廷根的马克斯·玻恩（Max Born）的量子力学学派。当时正是20年代的哥廷根的黄金时代。从全世界到那里去的很多的年轻物理学家后来都成为著名的科学家，例如维尔纳·海森堡（Werner Heisenberg），罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer），保罗·狄拉克（Paul Dirac）和爱德华·武勒（Edward Teller）。其中还有一位年轻的俄罗斯人乔治·

伽莫夫（George Gamow），他是专门研究放射性问题的，也就是原子核的自然衰变问题。

有些化学元素会自身发生衰变。铀衰变成钍，钍又衰变成镭，镭还会继续衰变。最常见的镭原子核是由88个质子和138个中子组成。经过一定时间后，一个镭核会自然放出两个中子和两个质子，从而变成一个质量较小的原子核。而放出来的粒子又组成一个氦核。人们很难理解，一个镭核怎么会放出一个氦核来。镭核内的粒子受到一个强大的核力约束而拥挤在一个很小的空间内。核力比质子间的电荷排斥撕开而四处飞散。但是核力的作用距离很短。假如一个核的一部分和其余的部分分离开了，于是电荷排斥力就会变成主要的，并使这两部分分开。按照经典物理的观点，这是不可能的，因为核力把原子核约束在一起。然而这种现象在自然界却是存在的。

伽莫夫解决了原子的衰变问题。镭核内的粒子受到核力的约束而不能分裂，这一点虽然是正确的，但是现代的量子力学却告诉我们，这种分裂仍有可能发生。尽管经典物理认为这是不允许的，但是核的一部分会在偶然间冲破强大的核力作用，并离开其余部分使电荷排斥力

起主要作用，并在它的作用下将这两个裂变物分别推开。虽然发生这种过程的几率非常小，但还是有可能发生。至于镭原子，人们需要等待1000年以上，它才会分离出一个氦核。

人们称这种现象为隧道效应。它只有通过量子力学才能被人们所了解。这个名称来源于一个很形象的图像：镭核中的粒子被核力所束缚，就好像有一座环形山从外部将它们包围住一样，粒子的能量没有达到使它们可以越过这座山而跑到边缘去。按经典力学的说法，这座山粒子是无法通过的。但是按照量子力学来讲，粒子还有可能通过。即核内的粒子在偶然间可以不从山的上面越过去，而是从穿过山的一条隧道中通过。

伽莫夫认为，假如粒子能够由内向外穿过环形墙，那么粒子也应该能够由外向内穿过它而进入原子核内。

现在我们回到恒星的问题上来，并回顾20年来关于恒星能源问题的进展情况。如果镭核能够发生本来不可能发生的变化，为什么在太阳内部质子就不可以发生被物理学家认为不应该的变化呢？核力本应约束住镭核内的粒子，使它们不能分开而达到电荷排斥力起作用的距

离。即镭核本来是不可能发生衰变的，但是它仍然会衰变。在太阳内质子本来不应发生聚变，是不是也会发生聚变呢？

物理学家罗伯特·阿特金森（Robert Atkinson）（Fritz Houtermans）根据伽莫夫的隧道效应解开了恒星内部能量产生之谜。1929 年 3 月他们给德国《物理学报》编辑部投寄了一篇文章，题目是《关于恒星内部元素结构的可能性问题》。在这篇文章的开头写到："不久前伽莫夫指出，带正电荷的粒子的能量按照经典的概念还不能够使它们穿透到原子核内，但是它们还是穿透到原子核内了……"。作者是这样解释的，氢核本来根据经典物理学要在几百亿度的温度下才能发生聚变，但它们是怎样在远比这个温度低得多的恒星内部也能够达到非常近的距离的呢？在恒星内一个质子和其他质子之间因受电场力作用而分开，就好像被一座山分开一样。质子的能量本来不可能越过这座山，但是也许经过很长时间，它就能够穿过这座山，好像是穿过一条隧道而到达山的那边。这种效应发生足够多的次数，使得太阳和恒星可以依靠在此过程中所释放出的能量而生存。阿特金森和豪特曼斯证实了爱丁顿的推测，即太阳和恒星是依

靠氢聚变为氦来实现它们的能量需求的。它们的工作给热核反应理论奠定了基础，这个理论也就是在恒星内产生能量过程的理论。太阳和恒星的能源已经找到了。

当罗伯特·容克（Robert Jungk）为撰写《比一千个太阳还要亮》一书而收集资料时，豪特曼斯当时曾向他讲述过："一天黄昏，当我们完成了我们的文章以后，我和一位漂亮的姑娘去散步。天空暗下来，星星一个接一个地出现了，非常壮观。我的女伴叫起来：'星星一闪一闪的多美呀！'我有点自鸣得意地说到：'从昨天起我就知道它们为什么会发光'。她似乎没有任何反应。是真的相信我吗？我猜想在当时这对她是无关紧要的事情。

"1965年当我到哥廷根大学工作时，我曾想到要了解一下这位女士是否还在哥廷根，但这件事也像其他一些计划一样一直没有办成。7年后我在雅典碰到了她。我是去那里参加一个会议。当时已经移居到美国印第安那州布卢明顿城的阿特金森也来参加这个会议。阿特金森的妻子，一位活跃的柏森女士，她就是当初的那位姑娘。她向我说，豪特曼斯的确向她讲过这一段话，但绝不像容克在他的书中所描写的那么

浪漫。我从她那里知道了许多重要的情况。我问阿特金森先生，他们当时怎么会想到做这项工作的。他说，他读了爱丁顿的书，从而知道了关于恒星能源的困境，即恒星内部的温度没有达到发生核聚变所要求的温度，而另一方面爱丁顿却坚信，太阳和恒星的辐射功率必定来源于核能。他把这件事告诉过豪特曼斯。当时，时机已经成熟，恰好伽莫夫刚刚写完了他的那篇文章，证明问题是可以解决的。他们二人终于解决了这个问题。

"从此，人们知道在恒星内部是可以发生核反应的。但是发生的是哪种核反应？是质子与质子聚合，还是质子穿入到其他原子核内？如果是后者，穿入到哪个原子核内？10年以后人们才得到了关于这些问题的答案。

碳 循 环

在恒星内，氢是怎样变成氦的？答案首先由美国的汉斯·贝特（Hans Bethe）和德国的卡尔·弗里德里希·冯·魏茨泽克（Carl Friedrich von Weizsacker）分别找到了。1938年他们第一次发现真的由氢变为氦的反应，这个反应确实能补偿恒星的能量消耗。

这个过程比较复杂，假设在恒星内部除了氢以外还有其他元素存在，例如还有碳。碳核起着化学中已知的催化剂的作用，氢核依附到这些催化剂的核上，经过一些反应步骤以后会生成氦核。由氢原子聚合成的氦原子最后分离出来，而碳核不会遭受任何损失。

一个质量数为12的碳核（我们把它用C^{12}来表示）与一个氢核相碰撞。由于隧道效应，氢核可以克服碳的电场排斥力而与碳核发生聚变。新产生的核是由13个重粒子组成。由于有带正电荷的质子进入，使得原来碳核的电荷数增加，即原子序数变大。新生成的核是质量数为13的一种氮元素的核。它是放射性核，经过一定时间它可以放出两个轻粒子，即一个正电子和一个中微子。氮核衰变成了质量数为13的碳核，它的标记为C^{13}。现在这个核的电荷数仍旧和开始时的碳核的电荷数相同，只不过质量数变大了。它是开始时的碳核的一种同位素。如果有一个其他的质子和这个碳的同位素相碰，就会再次产生氮。它的质量数为14，标记为N^{14}。如果新的氮核与一个质子相碰撞，就会反应变成O^{15}，即质量数为15的氧核。这种氧核同样是放射性核，它会放出一个正电子和一个中微子，并衰变

成质量数为 15 的氮核，即 N^{15}。我们考虑一下，在这个过程开始的时候只有一个质子数为 12 的碳核，而现在变成了一个质量数为 15 的氮核。由此可以看出，由于氢核不断地积聚，使原子变得越来越重。假如这时又有一个质子和这个氮核相碰撞，氮核会放出两个质子和两个中子，并变成一个原始的碳核 C^{12}，而放出的质子和中子又合并形成一个氦核，这样结束了整个循环。

在这个循环过程中总共 4 个质子被吞食了，并生成了 1 个氦核。即氢变成了氦。同时在这个过程中释放出的能量足以维持恒星辐射数十亿年。恒星物质被这个循环的各个分过程所加热。一部分是通过反应中产生的光量子能将量转移给恒星的气体物质，一部分是正电子迅速地和周围飞过的电子发生湮没，而由此产生的光量子又使恒星物质得到附加的热量。中微子也携带了部分的能量。

根据 1938 年贝特和冯·魏茨泽克所发现的碳循环，贝特获得了 1967 年的诺贝尔物理学奖。诺贝尔委员会当时似乎没有很好调查就做出了决定，因此忘记了将这个奖金分开。